



TUGAS AKHIR – SF 091321

**ESTIMASI DURASI RUPTURE (T_{dur}), PERIODE
DOMINAN (T_d), DAN PERIODE LEBIH DARI 50
DETIK (T_{50Ex}) GEMPA BUMI DI JEPANG SEBAGAI
PERINGATAN DINI TSUNAMI**

**MUHAMAD ARIS BURHANUDIN
NRP. 1112100086**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U
Prof. Dr. Madlazim, M.Si**

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



TUGAS AKHIR – SF 091321

**ESTIMASI DURASI *RUPTURE* (T_{dur}), PERIODE
DOMINAN (T_d), DAN PERIODE LEBIH DARI 50
DETIK (T_{50Ex}) GEMPA BUMI DI JEPANG SEBAGAI
PERINGATAN DINI TSUNAMI**

**MUHAMAD ARIS BURHANUDIN
NRP 1112100086**

**Dosen Pembimbing
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Prof. Dr. Madlazim, M.Si**

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT – SF 091321

**THE ESTIMATION OF RUPTURE DURATION
(T_{dur}), DOMINANT PERIOD (T_d), AND
DURATION OF 50 SECOND EXCEEDANCE
(T_{50Ex}) OF EARTHQUAKE IN JAPAN AS
TSUNAMI EARLY WARNING**

**MUHAMAD ARIS BURHANUDIN
NRP 1112100086**

**Supervisor
Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Prof. Dr. Madlazim, M.Si**

**Physics Department
Faculty of Mathematics and Natural Science
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

**ESTIMASI DURASI *RUPTURE* (T_{dur}), PERIODE
DOMINAN (T_d), DAN PERIODE LEBIH DARI 50
DETIK (T_{50Ex}) GEMPA BUMI DI JEPANG SEBAGAI
PERINGATAN DINI TSUNAMI**

TUGAS AKHIR

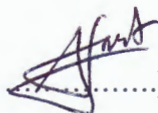
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Fisika Bumi
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

oleh :

MUHAMAD ARIS BURHANUDIN
NRP. 1112 100 086

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir :

Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.
NIP. 19620802 198701.1.001

()

Prof. Dr. Madlazim, M.Si
NIP.19651105 199103.1.012

(.....)

Surabaya, Juni 2016

**ESTIMASI DURASI *RUPTURE* (T_{dur}), PERIODE
DOMINAN (T_d), DAN PERIODE LEBIH DARI 50
DETIK (T_{50Ex}) GEMPA BUMI DI JEPANG SEBAGAI
PERINGATAN DINI TSUNAMI**

Nama Mahasiswa : Muhamad Aris Burhanudin
NRP : 1112 100 086
Jurusan : Fisika FMIPA-ITS
Pembimbing I : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Pembimbing II : Prof. Dr. Madlazim, M.Si

Abstrak

*Penelitian ini membahas tentang mitigasi tsunami yang disebabkan oleh gempa bumi di kepulauan Jepang. Jepang merupakan salah satu wilayah yang memiliki seismisitas tinggi akibat adanya 4 lempeng aktif dunia yang saling menumbuk. Tahun 2011, tsunami dasyat terjadi di Jepang sehingga penelitian tentang prediksi tsunami menggunakan program Joko Tingkir perlu dilakukan guna mitigasi bencana tsunami. Program Joko Tingkir mampu mengestimasi dengan cepat nilai durasi rupture, periode dominan dan periode lebih dari 50 detik dan perkaliannya untuk menentukan apakah gempa bumi tersebut memicu tsunami atau tidak. Hasil penelitian pada 120 event gempa yang terjadi pada tahun 2011-2016, termasuk gempa bumi yang menimbulkan tsunami Tohoku-Oki, didapatkan kesimpulan nilai parameter-parameter rupture gempa bumi di Jepang pada tahun 2011-2016, yaitu; Durasi rupture (T_{dur}): 2.9 – 200, Periode Dominan: 2.9 – 70.02, $T_{50 Exceedance}$: 0.49 – 55, $T_d * T_{50Ex}$: 0.085 – 929.513, $T_{dur} * T_{50Ex}$: 0.0214 – 11825.2 dan keakuratan program joko tingkir mencapai 96.15% terhadap data NOAA.*

Kata Kunci: Program Joko Tingkir, Rupture, Tsunami

THE ESTIMATION OF RUPTURE DURATION (T_{dur}), DOMINANT PERIOD (T_d), AND DURATION OF 50 SECOND EXCEEDANCE (T_{50Ex}) OF EARTHQUAKE IN JAPAN AS TSUNAMI EARLY WARNING

Name : Muhamad Aris Burhanudin
NRP : 1112 100 086
Department : Fisika FMIPA-ITS
Supervisor I : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Supervisor II : Prof. Dr. Madlazim, M.Si

Abstract

*The research studies about tsunami prediction which caused by earthquake in Japanese archipelago. Japan has high seismicity because 4 world active plates crash each other and in the 2011, mega tsunami occurred in japan. So, the research about tsunami prediction by using Joko Tingkir program is very needed to be done for tsunami hazard mitigation. Joko Tingkir program can estimate rapidly the value of rupture duration, dominant period, T50 Exceedance and it's multiple. The parameter of rupture can give information about tsunami generation which is caused by earthquake more than magnitude of earthquake. After studying 52 earthquakes in Japan since 2011 to 2016, including the earthquake which generates tohoku-oki tsunami, it concludes that the value of rupture parameters of the earthquake is: Rupture Duration (T_{dur}): 2.9 – 200, dominant period: 2.9 – 70.02, T50 Exceedance: 0.49 – 55, $T_d * T_{50Ex}$: 0.085 – 929.513, $T_{dur} * T_{50Ex}$: 0.0214 – 11825.2 and the accuracy of Joko Tingkir program is 96.15% of NOAA data.*

Key Word: *Joko Tingkir program, Rupture, Tsunami.*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirrabbi ‘alamiin, puji syukur penulis ucapkan hanya kepada Allah SWT yang telah melimpahkan riski dan rahmat-Nya selama penulis menjalani perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, sehingga penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

ESTIMASI DURASI *RUPTURE* (T_{dur}), PERIODE DOMINAN (T_d), DAN PERIODE LEBIH DARI 50 DETIK (T_{50Ex}) GEMPA BUMI DI JEPANG SEBAGAI PERINGATAN DINI TSUNAMI

Dengan terselesaikannya tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunannya terutama kepada:

1. Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU dan Prof. Dr. Madlazim M.Si yang memberikan bimbingan mulai awal penulisan tugas akhir hingga selesai.
2. Sungkono, M.Si dan Dr. Zainal Arifin sebagai dosen penguji tugas akhir.
3. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA ITS.
4. Bapak Dr. Mashuri selaku dosen wali.
5. Seluruh Staf Pengajar di Jurusan Fisika ITS.
6. Kedua orangtua penulis, Mochamad Samhadi dan Siti Chariroh yang telah memberikan banyak do’a, dukungan dan semangat yang tiada henti serta dukungan dari adik tercinta, Agil Abdul Azis.
7. Rizki Fitri, R.U yang selalu *obrak-obrak* dan memberi semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Teman-teman Geo seperjuangan tugas akhir 114, Samsul, Zahra, Fandi, Zumroh, Riandi, Chichi, Dyah, Dewi, Lina, Indri, Latif, Amal, Pram, Laili, Irwan.
9. Penghuni Lab404 Geofisika Pak Kis, Mas Tohr, Mas Rezk,

Mas Nanang, Mas Wisnu, Mas Mufid, Mas Mifta, Mas Wildan

10. Rekan-rekan TST-Bussiness Community yang selalu *merepotkan* but bisa menghilangkan rasa jenuh dalam mengerjakan tugas akhir.
11. Para Pujangga “Age of Mentoring”. Mas Nanda (Mentor), Arie, Huda, Imin, Aqor, Hilmi, Teguh, Misbah, Azis, Alfian, Maul, Agus, Ryan, Reza, Irvan. Ukhuwah islam yang indah.
12. Komting, para “J”, dan teman-teman Meson 2012 yang selalu berbagi semangat dan perhatian selama berkuliah mulai tahun 2012 hingga sekarang penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
13. Dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari akan keterbatasannya, berharap kritik dan saran yang membangun. Semoga dengan adanya Tugas Akhir ini dapat menginspirasi pembaca dan menyumbangkan ilmu khususnya dalam bidang geofisika.

Surabaya, 14 Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

Bab	Halaman
Halaman Judul	i
Cover Page	ii
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	iv
Abstract	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1 Kondisi Tektonik Jepang	5
2.2 Gempa Bumi	6
2.3 Teori Tektonik Lempeng	9
2.4 Teori Bingkai Elastik	10
2.5 <i>Focal Mechanism</i> dan Geometri Sesar	12
2.6 Tsunami	14
2.6.1 Gempa Tektonik	16
2.6.2 Erupsi Gunung Api	17
2.6.3 Longsoran	18
2.7 Gelombang Gempa Bumi	19
2.8 Parameter Gempa Bumi	20

2.9 Episenter Gempa Bumi	21
2.10 Kedalaman Gempa Bumi	22
2.11 <i>Rupture</i> Gempa Bumi	23
2.12 Program Joko Tingkir	25
2.13 Teori Penghalusan Sinyal	26
2.14 Fast Fourier Transform	28
BAB III METODOLOGI.....	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Persiapan	33
3.3 Penentuan Lokasi Penelitian	34
3.4 Data Penelitian	34
3.5 Pengolahan Data	35
3.6 Analisa dan Pembahasan.....	40
3.7 Kesimpulan	41
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Analisa Data.....	43
4.1.1 Data Penelitian.....	43
4.1.2 Hasil Perhitungan.....	45
4.2Pembahasan	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN.....	59
Lampiran 1. Data Stasiun yang digunakan	59
Lampiran 2. Data Sejarah Tsunami NOAA	63
Lampiran 3. Data event gempa bumi jepang 2011-2016	65
BIODATA PENULIS	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Tektonik Jepang	5
Gambar	2.2	Lempeng Tektonik	7
Gambar	2.3	Struktur Lapisan Bumi	8
Gambar	2.4	<i>Continental Drift Theory</i>	10
Gambar	2.5	Mekanisme Gempa Bumi Menurut Teori Bingkai Elastik	11
Gambar	2.6	Kecepatan Gelombang Tsunami Terhadap Kedalaman	15
Gambar	2.7	Tsunami Akibat Gempa Tektonik	17
Gambar	2.8	Lingkaran Api Pasifik (Pacific Ring of Fire)	18
Gambar	2.9	Longsor Bawah Laut	18
Gambar	2.10	Gelombang Gempa Bumi:(a) Gelombang P, (b) Gelombang S, (c) Gelombang R, (d) Gelombang L	20
Gambar	2.11	Efek tepi penghalusan menggunakan fungsi triangle	27
Gambar	2.12	Diagram kupu-kupu (<i>butterfly diagram</i>) FFT Radix-2 DIT	32
Gambar	3.1	Diagram Alir Penelitian	33
Gambar	3.2	Peta Kepulauan Jepang	34
Gambar	3.3	Diagram Alir Pengolahan Software “Joko Tingkir”	35
Gambar	3.4	Tampilan Dasar Seisgram2k60	36
Gambar	3.5	Seismogram Kecepatan Gempa Bumi	37
Gambar	3.6	Picking kedatangan awal gelombang P(Po)	37
Gambar	3.7	Seismogram Difilter Dengan Frekuensi Tinggi	38

Gambar	3.8	Seismogram Yang Telah Dikuadratkan	38
Gambar	3.9	Seismogram yang telah dihaluskan dengan <i>Triangle Smoothing</i> dan telah dinormalisasi	39
Gambar	3.10	<i>Picking</i> waktu delay untuk 90% (T0,9), 80% (T0,8), 50% (T0,5), dan 20% (T0,2)	39
Gambar	3.11	Tampilan Akhir Seismogram Dalam Perhitungan Tdur	40
Gambar	4.1	Lokasi Stasiun	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Indikator Parameter <i>Rupture</i> gempa bumi	26
Tabel 4.1 Gempa bumi yang berpotensi tsunami pada tahun 2011-2016	43
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Joko Tingkir dan Data NOAA	46

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tsunami merupakan salah satu bencana alam yang dapat disebabkan oleh gempa bumi. Gempa bumi yang memiliki kriteria tertentu dapat memicu gelombang tsunami karena lempeng bumi mengalami pergeseran dalam skala besar di dasar laut dan menyebabkan kestabilan air laut terganggu. Beberapa lembaga seismologi dunia seperti *Japan Meteorological Agency (JMA)*, *Pacific Tsunami Warning System (JTWS)* dan *Indonesia Tsunami Early Warning System (Ina-TEWS)* pertama kali mengidentifikasi gempa bumi yang menimbulkan tsunami berdasarkan parameter-parameter gempa bumi yaitu magnitudo, lokasi dan kedalaman gempa bumi (Madlazim, 2013). Namun parameter-parameter yang digunakan tersebut belum secara akurat mengidentifikasi gempa bumi yang menimbulkan tsunami. Sehingga diperlukan parameter-parameter lain untuk mendapatkan informasi lebih banyak tentang gempa bumi yang menimbulkan tsunami (Masturiono, 2012).

Lomax dan Machelini (2009) menentukan gempa bumi yang menimbulkan tsunami dengan mengestimasi nilai *rupture* gempa bumi dengan cara menganalisa seismogram grup gelombang P yang dominan dari seismogram frekuensi tinggi. Lomax dan Mechelini (2009) juga telah menemukan bahwa panjang *rupture* gempa bumi sebanding dengan durasi *rupture* gempa bumi.

Jepang merupakan wilayah yang memiliki tingkat seismisitas yang tinggi. Hal ini disebabkan Jepang berada pada jalur Lingkar Api Pasifik. Selain itu, wilayah Jepang merupakan wilayah pertemuan 4 lempeng tektonik aktif, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Amerika Utara, Lempeng Pasifik dan Lempeng Philipina. Lempeng Eurasia dan Lempeng

Amerika Utara bertemu di wilayah daratan Jepang, yaitu di pulau Honshu. Wilayah dengan kondisi seismisitas tinggi menjadikan Jepang memiliki resiko tinggi terjadi gempa bumi yang memicu tsunami. Oleh sebab itu perkembangan ilmu tentang mekanisme parameter gempa dan tsunami di Jepang sangat pesat.

Pada tugas akhir ini akan disajikan penelitian tentang prediksi tsunami pada beberapa gempa bumi berpotensi tsunami yang terjadi di kepulauan Jepang. Prediksi dilakukan dengan menggunakan program Joko Tingkir. Program “Joko Tingkir” mengestimasi 5 parameter sumber gempa yaitu durasi *rupture* (T_{dur}), lama durasi dominan (T_d) dan durasi lebih dari 50 detik (T_{50Ex}) dan perkalian antara durasi dominan dan durasi lebih dari 50 detik ($T_d T_{50Ex}$) serta perkalian antara durasi *rupture* dan durasi lebih dari 50 detik ($T_{dur} T_{50Ex}$) pada gelombang P yang pertama (Madlazim, 2013). Kelebihan program “Joko Tingkir” adalah program ini mampu melakukan perhitungan dengan cepat kurang dari 2 menit. Sehingga apabila terjadi gempa bumi, nilai dari parameter-parameter penyebab gempa dapat diestimasi dengan cepat dan tindakan mitigasi bencana dapat segera dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana nilai durasi *rupture*, periode dominan dan periode lebih dari 50 detik untuk gempa bumi di Jepang?
2. Bagaimana keakuratan program “Joko Tingkir” dalam menentukan gempa bumi yang menimbulkan tsunami?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Event gempa yang digunakan adalah gempa bumi yang berpotensi tsunami di wilayah Jepang.

2. Menggunakan data gempa bumi signifikan yang terjadi pada tahun 2011-2016.
3. Sinyal gempa bumi diunduh dari www.fnet.bosai.go.jp
4. Kecepatan gelombang seismik sama untuk semua arah.
5. Kecepatan ruptur suatu gempa bumi adalah konstan sepanjang sesar dan pada kedalaman yang sama.
6. Penelitian ini dibatasi hanya pada penentuan parameter *rupture* dan Tsunami

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai Durasi *Rupture* (T_{dur}), Periode Dominan (T_d) dan Periode lebih dari 50 detik (T_{50Ex}) untuk gempa bumi yang terjadi di wilayah Jepang.
2. Mengetahui keakuratan program “Joko Tingkir” dalam menentukan gempa bumi yang menimbulkan tsunami.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan mitigasi bencana gempa bumi dan tsunami dengan meninjau parameter-parameter yang didapatkan dari hasil penelitian ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penulisan tugas akhir ini tersusun dari beberapa bab. Sistematika penulisannya sebagai berikut:

- BAB I** : Pendahuluan
 Berisi mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir.
- BAB II** : Tinjauan Pustaka
 Berisi tentang teori-teori yang mendukung penelitian ini.

- BAB III** : Metodologi Penelitian
Berisi tentang pengambilan data, proses estimasi durasi ruptur dengan menggunakan program “Joko Tingkir” dan perhitungan langsung.
- BAB IV** : Analisis Data dan Pembahasan
Bab ini menjelaskan analisa hasil penelitian sehingga didapatkan suatu informasi penting.
- BAB V** : Kesimpulan dan Saran
Berisi tentang hasil yang didapat setelah melakukan penelitian sesuai tujuan penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya yang berkaitan topik tersebut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Tektonik Jepang

Secara geografis, Jepang terletak pada 30° LU – 47° LU dan 128° BT – 146° BT. Jepang merupakan wilayah yang memiliki tingkat seismisitas yang tinggi. Hal ini disebabkan Jepang terletak pada zona gunung api, yang dikenal sebagai Lingkaran Api Pasifik. Wilayah Jepang menjadi tempat tumbukan 4 lempeng tektonik yang masih aktif, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Amerika Utara, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Philipina. Di bagian selatan Lempeng Philipina menghujam di bawah Lempeng Eurasia memotong Pulau Honshu di daerah Kansai. Pada bagian tengah dan utara, Lempeng Amerika Utara bergerak menumbuk Lempeng Eurasia dan sekaligus ditumbuk oleh Lempeng Pasifik (Wifayanti dan Santosa, 2014). Kondisi lempeng kepulauan Jepang dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Tektonik Jepang (USGS, 1999).

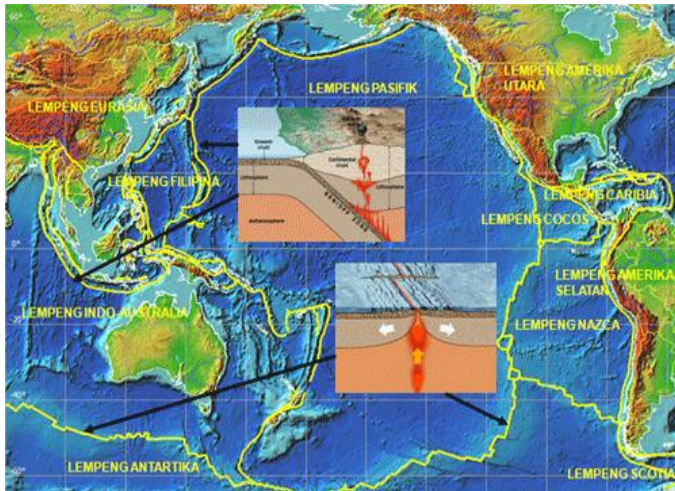
Kondisi tektonik tersebut yang menyebabkan Jepang merupakan wilayah yang memiliki tingkat resiko tinggi terjadi gempa bumi yang memicu tsunami (Muhari dan Gusman, 2011).

Dari penelitian Usami(1979), tentang catatan sejarah gempa bumi dan tsunami yang terjadi di Jepang, didapatkan informasi bahwa sejak tahun 500 sampai tahun 1975 Jepang telah dihantam 113 gempa bumi berkuatan M 7-8 dan 23 kali gempa bumi M>8 serta 50 kali terjadi tsunami (Tatsuo, 1979).Salah satu gempa bumi besar yang memicu tsunami yang terjadi di wilayah Jepang adalah gempa bumi Honshu-Hokkaido pada tahun 2003 dengan magnitudo mencapai 8SR dan gempa bumi Tohoku-Oki pada tahun 2011 dengan magnitudo lebih besar, yaitu 9 SR.

Pada data yang dikembangkan NOAA, tsunami pertama yang terdokumentasi di Jepang adalah tsunami pada tahun 684 dan apabila dihitung hingga tahun 2011, tsunami telah menghantam wilayah Jepang sebanyak 196 dalam kurun waktu 1300 tahun (Muhari dan Gusman, 2011). Berdasarkan penelitian dengan menggunakan sejarah sedimentasi, tsunami dengan kekuatan besar terjadi dengan perioda ulang 1000 tahun. Hal ini yang dijadikan pedoman mitigasi bencana di wilayah Jepang (Minoura et al., 2001).

2.2 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi secara tiba-tiba yang ditandai oleh patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari gerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi.



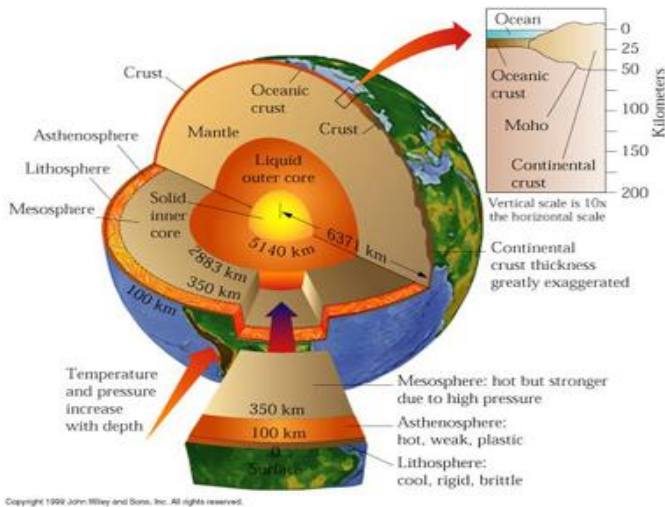
Gambar 2.2 Lempeng Tektonik (USGS, 1999).

Menurut teori Lempeng Tektonik, permukaan bumi terpecah menjadi beberapa lempeng tektonik besar (lihat **Gambar 2.2**). Lempeng tektonik adalah segmen keras kerak bumi yang mengapung di atas astenosfer yang cair dan panas. Oleh karena itu, lempeng tektonik ini bebas untuk bergerak dan saling berinteraksi satu dengan yang lain.

Daerah perbatasan lempeng-lempeng tektonik merupakan tempat-tempat yang memiliki kondisi tektonik yang aktif yang menyebabkan gempa bumi, gunung berapi dan pembentukan dataran tinggi. Teori Lempeng Tektonik merupakan kombinasi dari teori sebelumnya yaitu teori Pergerakan Benua (*Continental Drift*) dan teori Pemekaran Dasar Samudra (*Sea Floor Spreading*). Lapisan paling atas bumi, yaitu litosfer merupakan batuan yang relatif dingin dan bagian paling atas berada pada kondisi padat dan kaku. Di bawah lapisan ini terdapat batuan yang jauh lebih panas yang disebut mantel. Lapisan ini sedemikian panasnya sehingga senantiasa dalam keadaan tidak kaku sehingga dapat bergerak sesuai dengan proses pendistribusian panas yang disebut

sebagai aliran konveksi. Lempeng tektonik yang merupakan bagian dari litosfir padat dan terapung di atas mantel ikut bergerak satu sama lainnya (lihat **Gambar 2.3**). Ada tiga kemungkinan pergerakan satu lempeng tektonik relatif terhadap lempeng lainnya yaitu apabila kedua lempeng saling menjauhi, saling mendekati dan saling geser (Yanuarsih, 2012).

Jika dua lempeng bertemu pada suatu sesar, keduanya dapat bergerak saling menjauhi, saling mendekati atau saling bergeser. Umumnya, gerakan ini berlangsung lambat dan tidak dapat dirasakan oleh manusia namun terukur sebesar 0-15 cm per tahun. Gerakan lempeng ini dapat mengalami macet dan saling mengunci, sehingga terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus sampai pada suatu saat batuan pada lempeng tektonik tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang kita kenal sebagai gempa bumi.



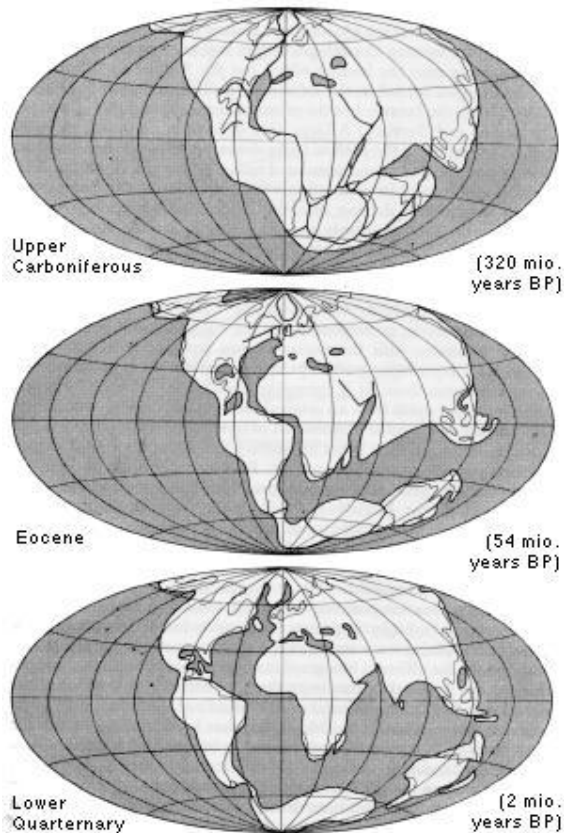
Gambar 2.3 Struktur lapisan bumi (USGS, 1999).

Menurut teori *elastic rebound*, mekanisme sumber gempa bumi dapat dijelaskan sebagai berikut, jika terdapat 2 buah gaya yang bekerja dengan arah berlawanan pada batuan kulit bumi,

batuan tersebut akan terdeformasi, karena batuan mempunyai sifat elastis. Bila gaya yang bekerja pada batuan dalam waktu yang lama dan terus-menerus, maka daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan akan mulai terjadi pergeseran. Akibatnya batuan akan mengalami patahan secara tiba-tiba sepanjang bidang sesar (*fault*) setelah itu batuan akan kembali stabil, namun sudah mengalami perubahan bentuk atau posisi. Pada saat batuan mengalami gerakan yang tiba-tiba akibat pergeseran batuan, energi *stress* yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran yang kita kenal sebagai gempa bumi.

2.3 Teori Tektonik Lempeng

Teori tektonik lempeng berasal dari hipotesa Alfred Wegener tentang pergeseran benua atau *continental drift*. Teori tektonik lempeng menjelaskan tentang bukti-bukti pergerakan skala besar yang terjadi pada bagian litosfer atau kerak bumi (lihat **Gambar 2.4**). Lapisan litosfer terbagi menjadi beberapa lempeng mayor dan lempeng minor yang bergerak saling bertumbukan karena mengapung di atas lapisan astenosfer yang bersifat fluida akibat panas dari inti bumi. Lempeng-lempeng tersebut bergerak relatif satu sama lain. Ada 3 tipe gerakan yang terjadi yaitu konvergen, divergen dan transform. Konvergen adalah gerakan saling mendekati atau menumbuk antar lempeng tektonik. Divergen adalah gerakan saling menjauh antar lempeng akibat arus konveksi astenosfer yang membentuk lapisan baru. *Transform* adalah gerakan menyamping antar lempeng (Wegener, 2002).



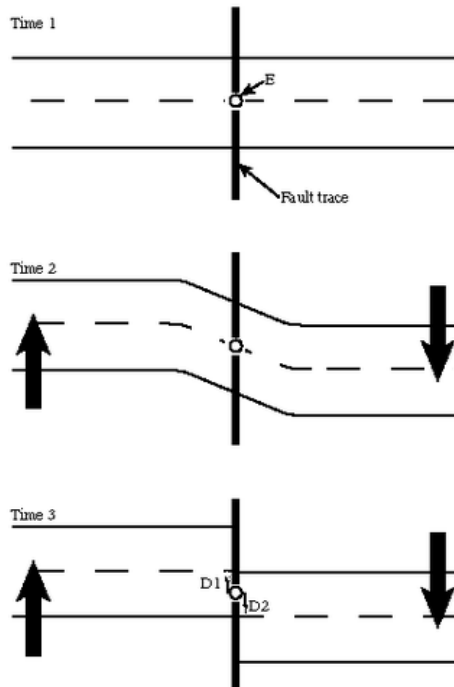
Gambar 2.4 Continental Drift Theory (Wegener, 2002).

2.4 Teori Bingkai Elastik (*Elastic Rebound Theory*)

Teori Bingkai Elastik (*Elastic Rebound Theory*) menjelaskan tentang proses terjadinya gempa bumi. Menurut teori ini gempa bumi terjadi karena lempeng-lempeng yang saling bergerak relatif dan saling bertumbukan. Proses yang terjadi secara terus-menerus ini mengakumulasi energi yang terpusat pada bidang perbatasan antar lempeng. Energi yang terakumulasi ini, suatu saat akan dilepaskan secara tiba-tiba oleh lempeng tektonik. Pelepasan energi inilah yang menyebabkan terjadinya gempa (lihat **Gambar**

2.5). Besar energi yang dilepaskan bergantung pada elastisitas batuan yang bertumbukan (Sapiie et al., 1999).

Menurut teori Bingkai Elastik, Gempa bumi terjadi melalui 3 tahapan yaitu pertama, dua lempeng tektonik aktif saling konvergen atau *transform*. Kedua, lempeng yang saling bertumbukan mengakumulasi energi pada bidang batas tumbukan dan lempeng mengalami stress. Terakhir, apabila tegangan pada lempeng melebihi ambang batas batuan maka akan terjadi pecah (*rupture*) (Madlazim dan Hariyono, 2014). Energi yang tersimpan dalam sistem setelah *rupture* akan terpancar keluar dalam bentuk gelombang seismik (Madlazim et al., 2010).



Gambar 2.5 Mekanisme gempa bumi menurut Teori Bingkai Elastic (Yatimantaro, 2013).

2.5 *Focal Mechanism dan Geometri Sesar*

Gempa bumi tektonik disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik yang saling bertemu. Di daerah pertemuan lempeng akan timbul tegangan akibat proses tumbukan, pergeseran dan/atau penyusupan antar lempeng yang menyebabkan tegangan antar lempeng. Sesuai dengan sifat elastis batuan, tegangan yang terus terkumpul akibat proses pergerakan lempeng akan mencapai batas elastisnya sehingga batuan akan patah. Pada titik patah ini, batuan akan melepaskan energi yang telah terkumpul dalam bentuk gelombang seismik secara tiba-tiba. Gelombang seismik ini yang dikenal sebagai gempa bumi (Tsang et al., 2015).

Terdapat 3 bentuk sesar yang terjadi pada proses patahan batuan, yaitu:

- a) Sesar mendatar: Gerakan sejajar jurus sesar, disebut juga sesar geser atau strike slip fault. Stress yang terbesar adalah stress horizontal dan stress vertikal kecil sekali atau transform fault.
- b) Sesar turun: Gerakan relatif ke bawah terhadap blok dasar, disebut juga sesar normal atau *gravity fault*.
- c) Sesar naik: Gerakan relatif ke atas terhadap blok dasar, disebut juga *thrust fault* atau *reverse fault*. *Thrust fault* adalah *reverse fault* yang mempunyai $dip < 45$ (Ibad dan Santosa, 2014).

Gempa bumi yang dapat membangkitkan tsunami adalah gempa bumi dengan momen seismik yang besar dengan posisi episenter yang bawah laut yang dangkal. Momen seismik menghitung besarnya energi yang dilepas berdasar pada perpindahan slip dan luas slip yang terjadi. Magnitudo gempa tidak cocok digunakan pada gempa berskala kecil karena perpindahan slip yang terlalu kecil. Hubungan antara momen seismik dan deformasi dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$M_o = \mu \cdot A \cdot D \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana:

M_0 = momen seismik gempa (Nm), μ = regiditas batuan (Nm^2), A = Luas Bidang Sesar (m^2) D = Deformasi / dislokasi (m) (Thomas dan Kanamori, 1979).

Beberapa parameter gempa yang perlu diketahui dalam hubungannya dengan pembentukan tsunami adalah magnitudo gempa, lokasi atau episenter pusat gempa, kedalaman pusat gempa, dan mekanisme fokus dan geometri sesar (Madrinovella, 2011). Secara empiris panjang, lebar dan *slip fault* dapat ditentukan berdasarkan persamaan Wells dan Coppersmith (1994), untuk jenis patahan turun (*normal fault*) dengan batas magnitudo $4.8 \leq M_w \leq 7.8$ menggunakan persamaan berikut:

$$M_w = 4.86 + 1.32 * \text{Log RL} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$M_w = 4.04 + 2.11 * \text{Log RW} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Log RA} = -3.49 + 0.91 * M_w \dots\dots\dots (2.4)$$

Sedangkan untuk jenis patahan naik (*reverse fault*) dengan batas magnitudo $4.8 \leq M_w \leq 8.1$ menggunakan persamaan berikut:

$$M_w = 5.00 + 1.22 * \text{Log RL} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$M_w = 4.37 + 1.95 * \text{Log RW} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{Log RA} = -3.99 + 0.98 * M_w \dots\dots\dots (2.7)$$

dan untuk jenis geser (*strike slip fault*) dengan batas magnitudo $5.2 \leq M_w \leq 8.1$ menggunakan persamaan berikut:

$$M_w = 5.16 + 1.12 * \text{Log RL} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$M_w = 3.80 + 2.59 * \text{Log RW} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\text{Log RA} = -3.42 + 0.90 * M_w \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan RL adalah *rupture length* (km), RW adalah *rupture width* (km) dan RA adalah *rupture area* (km^2) (Wells dan Coppersmith, 1994).

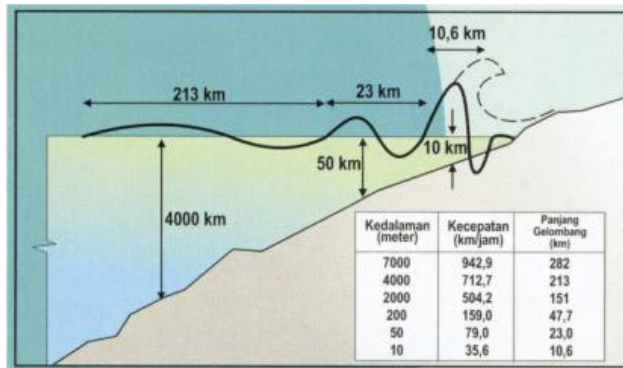
Untuk menghitung waktu tiba, amplitudo, dan tinggi gelombang tsunami, serta pengaruh gelombang tsunami terhadap

suatu wilayah maka dibuat model tsunami berdasarkan parameter yang telah ditentukan (Madrinovella, 2011).

2.6 Tsunami

Tsunami berasal dari bahasa Jepang yaitu “tsu” yang berarti pelabuhan dan “nami” yang berarti gelombang besar. Istilah tsunami berasal dari para nelayan yang berada di lautan yang tidak merasakan adanya gelombang yang sangat besar namun setibanya di pelabuhan, mereka mendapati bahwa kerusakan yang terjadi pada daratan sangat besar. Sehingga mereka beranggapan bahwa gelombang tersebut hanya terjadi di pelabuhan dan tidak di tengah laut yang dalam istilah tsunami lebih tepatnya diartikan sebagai gelombang laut besar yang terjadi secara tiba-tiba karena keseimbangan air laut yang berubah akibat gempa bumi (Yatimantaro, 2013).

Mekanisme pembentukan gelombang tsunami adalah ketika gempa bumi terjadi, ada perubahan dasar laut secara tiba-tiba berupa pengangkatan atau penurunan pada dua lempeng tektonik yang saling bertumbukan. Pengangkatan atau penurunan yang terjadi di dasar laut menyebabkan terjadi deformasi yang serupa pada permukaan laut. Sehingga menyebabkan kestabilan air laut terganggu. Selanjutnya, gelombang tsunami terbentuk akibat proses menuju kestabilan muka air laut (Diposaptono dan Budiman, 2006). Mekanisme gelombang tsunami dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Kecepatan gelombang tsunami terhadap kedalaman (Rahmawan et al., 2012)

Tsunami merupakan rangkaian gelombang yang memiliki ketinggian $\frac{1}{2}$ meter di atas permukaan laut dalam dengan kecepatan 942,9 km/jam, namun sewaktu mendekati pantai ketinggian gelombang menjadi 15 meter bahkan lebih dengan kecepatan mencapai 48 km/jam (UNESCO-OIC, 2006). Hubungan antara cepat rambat gelombang tsunami dengan kedalaman laut ditunjukkan persamaan berikut:

$$v = \sqrt{gh} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dengan v adalah kecepatan gelombang tsunami (m/s), g adalah percepatan gravitasi bumi (m/s^2), dan h adalah kedalaman laut (m) (Rahmawan et al., 2012).

Perubahan ketinggian tsunami di permukaan laut dalam ke laut dangkal merupakan bentuk konversi energi dari energi kinetik menjadi energi potensial. Tsunami bersifat merusak karena tsunami terdiri dari air laut yang bercampur dengan material-material yang padat, sehingga massa jenis tsunami lebih besar daripada air laut. Dengan massa jenis yang besar ini tsunami mampu merusak bangunan dan menyeret segala sesuatu kembali ke laut (Diposaptono dan Budiman, 2006).

Dalam menentukan kejadian tsunami, NOAA menggunakan kriteria It (IndeX Tsunami). Index tsunami dihitung berdasarkan

parameter gelombang yang terjadi didaratan dan dampaknya, yaitu ketinggian gelombang, korban mati, korban luka-luka, kerusakan dan kerusakan rumah. Index Tsunami dapat dinyatakan dapat persamaan berikut:

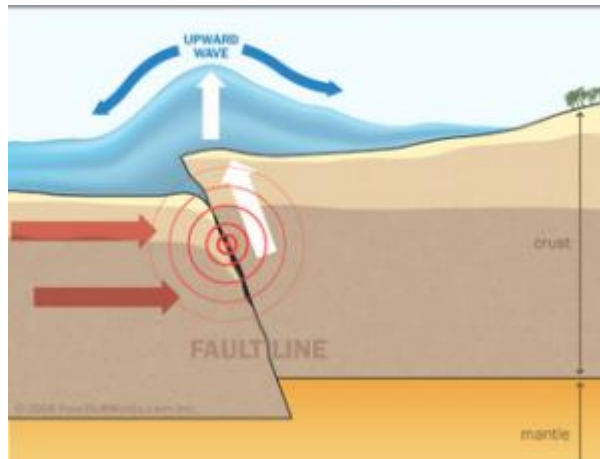
$$It = i_{height} + i_{deaths} + i_{injuries} + i_{damage} + i_{houses-destroyed} \quad (2.12)$$

Dengan nilai $i_{height} = 4, 3, 2, 1, 0$ untuk $h = 10, 3, 0.5, h > 0, h = 0$ m secara berurutan (Lomax dan Michelini, 2009 ; Madlazim, 2013)

Secara umum, faktor penyebab tsunami adalah:

2.6.1 Gempa Tektonik

Gempa tektonik merupakan gempa yang disebabkan oleh aktivitas pergerakan lempeng-lempeng tektonik yang saling bertumbukan (Diposaptono dan Budiman, 2006). Gempa tektonik merupakan penyumbang terbanyak terjadinya tsunami. Biasanya gempa bumi tsunami ini terjadi di zona subduksi. Pada zona ini lempeng yang memiliki densitas lebih besar akan menyusup ke bawah lempeng yang lain sehingga apabila akumulasi energi yang tersimpan pada proses konvergensi antar lempeng sudah melebihi ambang batas elastisitas lempeng maka akan terjadi gempa bumi dengan pusat gempa berada di bawah laut. Deformasi lempeng yang terjadi di bawah laut akan menyebabkan gelombang air laut yang besar di permukaan sehingga menyebabkan tsunami di daratan. (UNESCO, 2006)

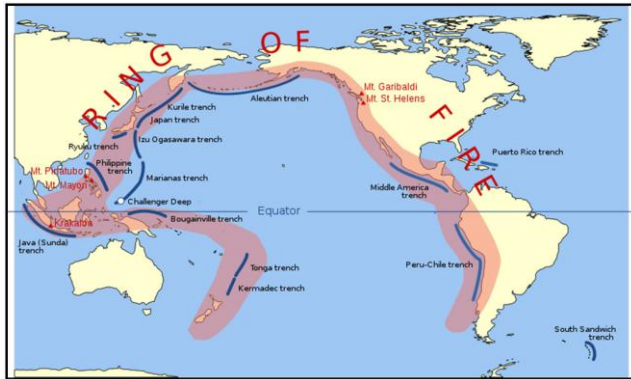


Gambar 2.7 Tsunami akibat gempa tektonik (UNESCO, 2006).

Proses pembangkitan dan penjaralan tsunami paling banyak disebabkan oleh gempa bumi yang terjadi pada zona subduksi (lihat **Gambar 2.7**). Pertama, lempeng samudra (densitas lebih besar) menyusup ke bawah lempeng benua pada proses konvergensi. Kedua, dua lempeng tersebut akan saling menekan dan membentuk gunung dan palung akibat lipatan-lipatan lempeng. Ketiga, apabila lempeng tidak mampu menahan tegangan yang terus diberikan maka akan terjadi pecah pada lempeng dan energi yang terakumulasi akan berubah menjadi gelombang gempa bumi dan mengganggu kestabilan muka air laut. Keempat, tsunami terbentuk.

2.6.2 Erupsi Gunung Api

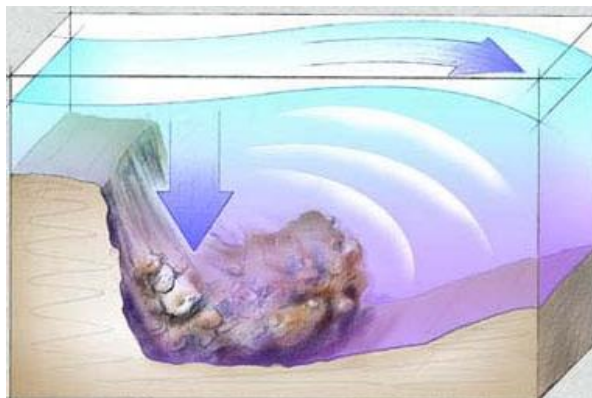
Aktifitas erupsi gunung api bawah laut juga dapat menyebabkan terjadinya tsunami, namun sangat jarang sekali terjadi. Tsunami yang disebabkan oleh erupsi gunung api bawah laut biasanya tidak terlalu besar dan hanya bersifat lokal (Diposaptono dan Budiman, 2006). Wilayah yang berpotensi terjadi tsunami adalah wilayah dalam Lingkaran Api Pasifik, termasuk Jepang. (lihat **Gambar 2.8**) (USGS, 2016).



Gambar 2.8 Lingkaran Api Pasifik (*Pacific Ring Of Fire*) (USGS, 2016)

2.6.3 Longsor

Longsor juga dapat memicu terjadinya tsunami. Longsor terjadi akibat gempa bumi, aktifitas gunung api atau akibat liquifaksi. Proses longsor bisa terjadi di bawah laut atau di permukaan (lihat **Gambar 2.9**). Longsor dengan jumlah material yang sangat besar dapat mengganggu kestabilan muka air laut. Tsunami akibat longsor sangat jarang terjadi (Diposaptono dan Budiman, 2006).



Gambar 2.9 Longsor di bawah laut (USGS, 2016)

2.7 Gelombang Gempa Bumi

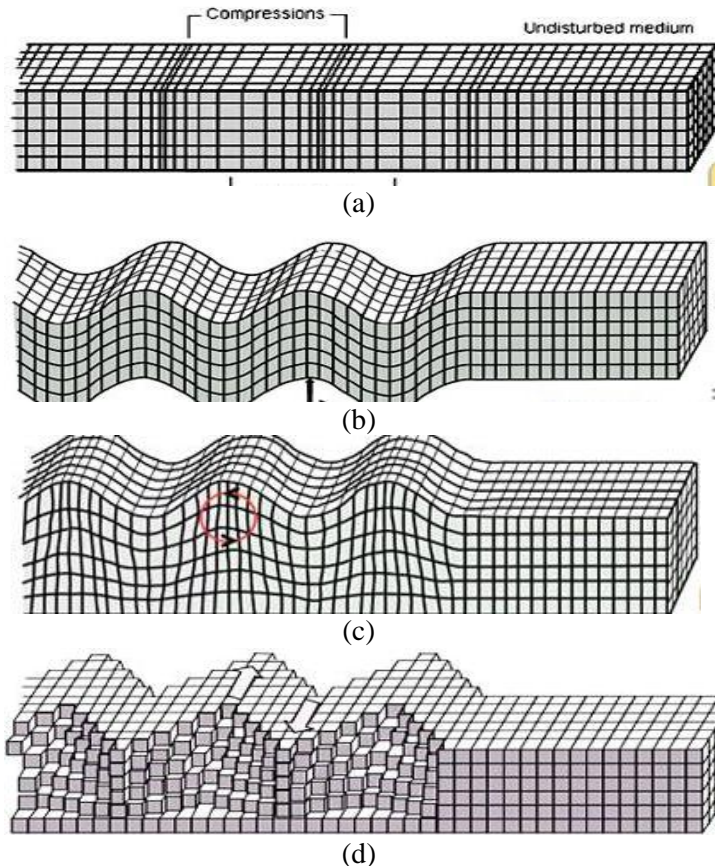
Dalam peristiwa gempa bumi, batuan menunjukkan sifatnya sebagai padatan elastik. Padatan elastik ini dapat menjalankan berbagai fase gelombang sehingga dapat mengakibatkan adanya pergerakan permukaan tanah setelah gempa terjadi. Ada dua tipe gelombang elastik dasar, yaitu:

1. Gelombang yang mengakibatkan kompresi dan peregangan material dalam arah perambatan gelombang.
2. Gelombang yang mengakibatkan pergeseran material elastik dalam bidang tegak lurus arah perambatan gelombang

Macam gelombang di atas disebut sebagai gelombang P dan S (lihat **Gambar 2.10 a dan b**). Gelombang P merupakan gelombang primer yang merambat lebih cepat dan datang pertama kali serta tajam (memiliki frekuensi yang lebih tinggi). Gelombang ini dapat merambat melalui medium padat, cair dan gas. Kecepatan gelombang P dalam padatan kira-kira sekitar 1.8 sampai 7 km/s, dan periodenya terletak antara 5 sampai 7 detik. Gelombang S merupakan gelombang sekunder atau transversal, dimana gelombang ini datang setelah gelombang P dan ditandai dengan amplitudo yang lebih besar dari gelombang P dan memiliki frekuensi yang lebih rendah, periodenya berada antara 11 sampai 13 detik. Gelombang S tidak dapat merambat pada medium gas atau cairan, sehingga tidak ada gelombang S yang dapat merambat dalam inti bumi luar dan lautan. Kedua fase gelombang ini dan turunan-turunannya (akibat dari transmisi, refraksi dan konversi gelombang) merambat dengan sudut yang riil, yaitu sudut datang di bawah 90^0 .

Kombinasi antara dua tipe gelombang kompresi dan geser di atas dengan sudut datang yang kompleks (terjadi ketika transmisi dengan sudut bias di atas 90^0) dan di tangkap di permukaan bumi disebut sebagai gelombang permukaan. Ada dua tipe gelombang permukaan yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang Love (lihat **Gambar 2.10 c dan d**). Gelombang Rayleigh terdiri dari campuran gerakan kompresi dan gerakan transversal. Keduanya bergerak lebih lambat dari gelombang P dan S, sehingga datang

lebih lambat pula dan mempunyai amplitudo yang besar dengan kandungan frekuensi yang rendah. Selain itu, keduanya mempunyai amplitudo yang besar karena keduanya berjalan sepanjang permukaan bumi (Khoiridah dan Santosa, 2014).



Gambar 2.10 Gelombang gempa bumi: (a) Gelombang P, (b) Gelombang S, (c) Gelombang R, (d) Gelombang L (USGS, 1999).

2.8 Parameter Gempa Bumi

Seiring dengan bertambahnya tingkat peradaban ilmu,

muncul kajian-kajian khusus tentang gempa bumi, dampak yang timbul akibat gempa bumi, deskripsi gempa bumi secara teoritis melalui pemodelan maupun pemanfaatan informasi yang diindikasikan oleh gempa bumi hingga kajian tentang parameter-parameter yang dapat disimpulkan dari penjalaran gelombang-gelombang tersebut (Ibad dan Santosa, 2014).

Parameter gempa yang dikenal saat ini ada 4, yaitu:

1. Waktu terjadinya gempa bumi (origin time)
2. Lokasi pusat gempa bumi (episenter)
3. Kedalaman pusat gempa bumi (depth)
4. Kekuatan gempa bumi (magnitudo)

Episenter dan kedalaman dari suatu gempa bumi sering disebut sebagai hiposenter gempa bumi (Khoiridah dan Santosa, 2014).

2.9 Episenter Gempa Bumi

Dalam seismologi, yang merupakan ilmu yang mempelajari gempa bumi dan struktur dalam bumi dengan menggunakan gelombang seismik yang didapatkan dari gempa bumi atau sumber lain, terdapat beberapa istilah. Diantaranya adalah hiposenter dan episenter. Hiposenter merupakan pusat gempa dalam bumi dan episenter adalah proyeksi hiposenter ke permukaan bumi. Berdasarkan lokasi episenternya, secara umum gempa diklasifikasikan menjadi dua, yaitu:

1. Gempa bumi dekat atau lokal

Merupakan gempa dengan jarak episenternya terhadap stasiun pencatat tidak lebih dari beberapa ratus kilometer sehingga kelengkungan bumi dapat diabaikan (Rahmawan et al., 2012). Gempa lokal dimanfaatkan untuk menyelidiki struktur permukaan bumi.

2. Gempa bumi jauh atau teleseismik

Merupakan gempa dengan jarak episenternya terhadap stasiun pencatat lebih dari 1000 kilometer (Mahardika dan Santosa, 2014). Kategori gempa inilah yang memegang peranan penting dalam penentuan struktur bagian dalam bumi. Banyak metode

yang telah dilakukan oleh ahli seismologi untuk menentukan episenter maupun hiposenter dari gempa bumi yaitu dengan metode lingkaran, metode hiperbola, metode bola, metode tripartit, metode Geiger dan lain sebagainya (Wifayanti dan Santosa, 2014).

2.10 Kedalaman Gempa Bumi

Gempa bumi dapat terjadi di antara permukaan bumi sampai 700 km di bawah permukaan. Gempa bumi pada rentang kedalaman 0 – 700 km dibagi menjadi 3 daerah yaitu dangkal, menengah dan dalam. Gempa bumi dangkal adalah gempa pada kedalaman 0 – 70 km. Gempa bumi menengah pada kedalaman 70 – 300 km dan gempa bumi dalam pada kedalaman 300 – 700 km.

Kedalaman dari suatu gempa dapat diketahui melalui seismogram yaitu melalui rekaman gelombang permukaannya. Walaupun pola gelombang permukaan tidak selalu mengindikasikan jenis gempa bumi berdasarkan kedalamannya, namun metode yang paling akurat untuk menentukan titik fokus dari gempa bumi adalah dengan membaca rekaman fase pada seismogram. Fase untuk kedalaman adalah karakteristik fase pP, refleksi gelombang P dari permukaan bumi pada suatu titik di dekat. Pada jarak stasiun seismogram, pP mengikuti gelombang P yang interval waktunya berubah secara perlahan terhadap jarak tetapi berubah cepat terhadap kedalaman. Interval waktu ini, $pP - P$ (pP minus P), digunakan untuk menghitung kedalaman fokus. Dengan menggunakan perbedaan waktu antara pP dan P yang terbaca pada seismogram dan jarak antara episenter dan stasiun seismograf, kedalaman gempa bumi dapat ditentukan dari kurva *travel time* atau tabel kedalaman.

Gelombang gempa lain yang digunakan untuk menentukan *focal depth* adalah fase sP, refleksi dari gelombang S sebagai gelombang P dari permukaan bumi pada titik dekat episenter. Gelombang ini terekam setelah pP, kira-kira 1,5 kali interval waktu $pp-P$. Kedalaman gempa bumi dapat ditentukan dari fase sP dan dengan cara yang sama seperti dengan menggunakan gelombang

pP yaitu dengan menggunakan kurva *travel time* dan tabel kedalaman untuk sP. Jika gelombang pP dan sP dapat diidentifikasi pada seismogram, *focal depth* dapat ditentukan secara akurat.

2.11 *Rupture* Gempa Bumi

Rupture gempa bumi adalah proses pensesaran atau pecahnya lempeng bumi disebabkan adanya gempa bumi. Menurut Lomax dan Machelini (2009), parameter *rupture* ini yang paling dominan sebagai penyebab tsunami. Besar dan dampak tsunami bergantung pada dimensi *rupture* yang terjadi di dasar laut yaitu dimensi *rupture* yang berhubungan dengan panjang (L), lebar (W), mean slip (D) dan kedalaman (z) dari *rupture* gempa bumi. Dimensi *rupture* ini menunjukkan pergeseran dasar laut yang menyebabkan perubahan kestabilan air laut di permukaan sehingga apabila terjadi gempa bumi yang menyebabkan luas *rupture* yang besar maka akan berpotensi terjadi tsunami (Lomax dan Machelini, 2011)

Proses pensesaran (*rupture*) merupakan proses yang rumit, terutama pada gempa bumi yang besar namun proses rumit ini dapat dipermudah dengan membagi bidang sesar menjadi bagian-bagian slip yang berbeda-beda (Kobayasi dkk, 2008). *Rupture* mulai terjadi di hiposenter kemudian berpropagasi ke seluruh bidang sesar dengan kecepatan tertentu yang disebut kecepatan *rupture* (v_r) dan mengasumsikan masing-masing bagian mengalami *displacement* statis, yaitu pergeseran yang bersifat tidak bisa kembali ke keadaan awal karena telah melewati batas elastisnya.

Momen seismik dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$M(t) = \mu A(t)D(t) \quad (2.13)$$

Dengan μ adalah suku rigiditas, luas bidang sesar $A(t)$ dan slip $D(t)$.

Rupture yang diakibatkan oleh gempa bumi dapat dinyatakan dalam hubungan momen seismik dengan dimensi *rupture* yaitu,

$$M_o = GLWD \quad (2.14)$$

dengan parameter G merupakan modulus geser di pusat sumber gempa bumi dan parameter panjang (L), lebar (W) serta jarak slip (D) dari *rupture* (Madlazim, 2011 a, b, c, d).

Dalam mengukur panjang *rupture* akibat gempa bumi diperlukan metode kompleks dan membutuhkan waktu yang lama sehingga tidak layak di sebut sebagai peringatan dini tsunami. (Lomax dan Machelini, 2011). pada tahun 2011. Lomax dan Machelini menemukan bahwa panjang *rupture* dapat berasosiasi dengan durasi *rupture* sehingga panjang *rupture* dapat diestimasi dengan mengestimasi durasi *rupture* yang terjadi.

Durasi *rupture* gempa bumi bisa dilakukan dengan cara menganalisa seismogram-seismigram grup gelombang P yang dominan dari seismogram berfrekuensi tinggi dari gempa bumi. Perhitungan durasi *rupture* gempa bumi dapat dilakukan dengan metode yang lebih sederhana dan membutuhkan waktu yang relatif lebih singkat daripada mengukur panjang *rupture* secara langsung sehingga peringatan dini tsunami dapat dilakukan dengan cara mengestimasi durasi *rupture* gempa bumi (Eist dan Yoshioka, 1996; Geist and Parsons, 2005).

Dengan asumsi kecepatan *rupture* gempa bumi adalah konstan sepanjang permukaan sesar maka panjang *rupture* dapat berhubungan langsung dengan parameter durasi *rupture* dari gelombang P utama. Hubungan ini dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$T_{dur} = \frac{L}{V_r} \quad (2.15)$$

Dengan L adalah panjang *rupture*, V_r adalah kecepatan *rupture* yang sebanding dengan kecepatan gelombang S (Lomax and Michelini, 2011).

Karena dalam Seismologi, v_r sebanding dengan z_q , maka Persamaan (2.14) menjadi

$$T_{dur} = \frac{L}{z_q} \quad (2.16)$$

Dengan z adalah kedalaman, q adalah koefisien yang bernilai positif. Sehingga hubungan L dan z bisa menyatakan bahwa T_{dur} sebanding dengan L/z_q (Lomax and Michelini, 2011).

Persamaan di atas memberi ilustrasi bahwa T_{dur} memberi informasi penting tentang L dan z , yang terpenting adalah semakin besar T_{dur} , semakin besar L dan semakin kecil z . Dua kondisi ini merupakan karakteristik dari kriteria potensi tsunami.

Parameter lain yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan gempa bumi tsunami adalah periode dominan dan periode lebih dari 50 detik. Periode dominan adalah periode puncak pada time domain gelombang P (Lomax dan Michelini, 2011).

$$\tau_c = 2\pi \frac{\int v^2(t)dt}{\int v^2(t)dt} \quad (2.17)$$

Periode dominan berasosiasi dengan lebar *rupture* akibat gempa bumi yang terjadi.

Periode lebih dari 50 detik adalah perbandingan RMS amplitudo saat durasi *rupture* mencapai periode lebih dari 50 detik dengan RMS amplitudo saat durasi *rupture* 0-25 detik. Periode lebih dari 50 detik berasosiasi dengan panjang *rupture* seperti T_{dur} namun memiliki estimasi yang lebih baik dari T_{dur} untuk gempa lokal (Masturiono, 2012; Lomax dan Michelini 2011).

2.12 Program Joko Tingkir

Program joko tingkir adalah program komputer yang mampu menghitung parameter-parameter gempa bumi yang menimbulkan tsunami yaitu durasi *rupture* (T_{dur}), periode dominan (T_d), *T50 Exceedance* ($T50Ex$) dan perkalian antara $T_d * T50ex$ dan $T_{dur} * T50ex$. Program ini ditulis dalam Bahasa

pemrograman “Bash” yang bisa berjalan dalam sistem operasi LINUX (UNIX). Software ini bisa digabungkan dan dijalankan dalam satu perintah (*commandline*) *shell* pada semua sistem LINUX (UNIX). Kompilasi ini membutuhkan software SeisGram2K60_20111209.jar yang bisa didownload di website: http://alomax.free.fr/seisgram/ver60/SeisGram2K_install.html.

Indikator potensi tsunami masing-masing parameter dapat dilihat pada **Tabel 2.1**:

Tabel 2.1 Indikator Parameter *Rupture* gempa bumi (Madlazim, 2011b)

Parameter	Indikator
Durasi <i>Rupture</i> (T_{dur})	>65
Periode Dominan (T_d)	>10
T_{50} Exceedance	>1
$T_{dur} * T_{50ex}$	>650
$T_d * T_{50ex}$	>10

2.13 Teori Penghalusan Sinyal

Dalam ilmu statistika, penghalusan data digunakan untuk menentukan fungsi pendekatan yang sesuai untuk mendapatkan pola penting pada data sehingga dengan menggunakan fungsi tersebut dapat menghilangkan noise atau data yang tidak diperlukan. Dalam proses penghalusan (*smoothing*), setiap data dalam sinyal dimodifikasi sehingga data yang berisi noise dapat menurun/hilang dan data yang diinginkan menguat (Jeffrey, 1998).

Penghalusan sinyal dapat dilakukan dengan 2 cara yang dapat membantu dalam analisis data yaitu dengan mengekstraksi informasi penting dari data menggunakan asumsi penghalusnya yang logis dan menganalisis dengan fleksibel dan *robust* (Jeffrey, 1998). Penghalusan (*Smoothing*) dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam algoritma yang berbeda. Pemilihan algoritma yang digunakan disesuaikan dengan data dan asumsi pola *noise* yang ingin dihilangkan.

Secara sederhana “smoothing” merupakan aplikasi dari proses “filtering”. Beberapa fungsi smoothing sinyal adalah fungsi ractangle dan triangle. Fungsi filter ractangle or “box car” dapat ditulis secara matematis sebagai berikut,

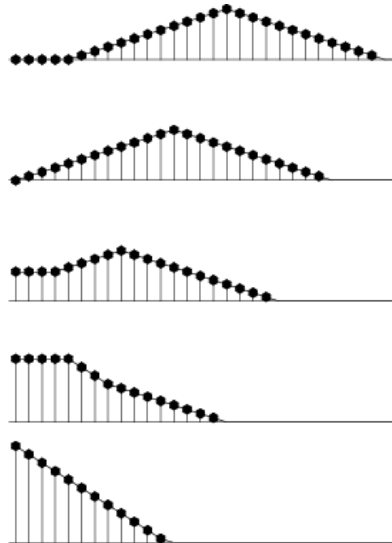
$$\frac{1-Z^5}{1-Z} = 1 + Z + Z^2 + Z^3 + Z^4 \quad (2.18)$$

Persamaan filter (2.18) memberikan rata-rata bergerak (*Moving Average*) pada jendela ractangular (Jeffrey, 1998).

Triangle smoothing adalah penghalusan rectangular yang dilakukan dua kali. Deskripsi matematis smoothing triangle menggunakan persamaan (2.19) (www.stanford.edu).

$$w(n) = 1 - \left| \frac{2(n)-N}{N} \right| \quad (2.19)$$

smoothing triangle memberikan sudut tajam di bagian atas fungsi segitiga. Seperti pada **Gambar (2.11)**.



Gambar 2.11 efek tepi penghalusan menggunakan fungsi triangle (www.stanford.edu).

2.14 Fast Fourier Transform

Fast Fourier Transform adalah suatu algoritma yang digunakan untuk mengolah sinyal dalam domain waktu diskrit menjadi domain frekuensi dan sebaliknya.

Domain waktu diskrit (Periode) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan gelombang untuk melakukan satu gelombang penuh dan dapat menentukan nilai periodisitasnya. Dengan demikian isyarat itu dikenal dengan istilah periodis, pengamatan dapat dilakukan dengan memantau gelombang kita dapat mengetahui nilai nilai yang terkandung dalam isyarat serta periodenya.

Domain frekuensi yang diartikan sebagai jumlah gelombang yang terbentuk dalam satuan waktu tertentu (1 detik). Frekuensi didefinisikan secara sederhana sebagai kebalikan dari waktu. Sehingga waktu yang satuannya adalah detik (second) akan menjadi Hertz (1-per second) hanya akan memiliki tepat satu nilai spektrum yang dikenal dengan spektrum frekuensi (Weinberg MD., 1991).

FFT (*Fast Fourier Transform*) merupakan turunan dari persamaan DFT (*Discrete Fourier Transform*) dimana jumlah perhitungan digital pada DFT dapat dikurangi secara signifikan sehingga dengan adanya penemuan FFT maka perhitungan digital terhadap spektrum-spektrum frekuensi dapat diwujudkan secara sederhana dalam implementasinya.

Prinsip dasar FFT (*Fast Fourier Transform*) adalah menguraikan penghitungan N -titik DFT menjadi penghitungan DFT dengan ukuran yang lebih kecil dan memanfaatkan periodisitas dan simetri dari bilangan kompleks W_N^{kn} (Weinberg MD., 1991). Algoritma FFT menggunakan algoritma DFT dengan merubah kompleksitas algoritma N^2 menjadi $N \log_2 N$.

a) Transformasi Fourier

Transformasi Fourier didefinisikan sebagai

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(-j2\pi ft) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(-j2\pi ft) dt \quad (2.20)$$

dengan

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{fungsi atau sinyal dalam domain waktu,} \\ e^{-j2\pi ft} &= \text{fungsi kernel,} \\ X(f) &= \text{fungsi dalam domain frekuensi,} \\ f &= \text{frekuensi.} \end{aligned}$$

Persamaan (2.20) digunakan untuk mentransformasikan sinyal dari domain waktu ke dalam domain frekuensi. Dengan keterbatasan biaya eksekusi pada komputer, maka persamaan (1), khususnya bagian real, didekati dengan

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(-j2\pi ft) dt &\rightarrow \sum_n x(n\Delta t) \cos(-j2\pi fn\Delta t) \Delta t \\ \sum_n x(n\Delta t) \cos(-j2\pi fn\Delta t) \Delta t &= \sum_n x(n\Delta t) \cos(2\pi nm\Delta f \Delta t) \Delta t \\ &= \sum_n x(n\Delta t) \cos\left(2\pi \frac{nm}{N}\right) \Delta t \end{aligned} \quad (2.21)$$

dengan m dan n adalah bilangan bulat.

Dalam domain waktu periode suatu sinyal dinyatakan sebagai T adalah $N\Delta t$, sedangkan pada domain frekuensi Δf adalah f_s/N dengan Δf menyatakan interval antar frekuensi dan f_s adalah $1/\Delta t = N\Delta f$. Dengan demikian, dalam persamaan (2.21) $\Delta t \Delta f$ adalah $1/N$ yang merupakan penghubung antara domain waktu dengan domain frekuensi. Bila jumlah data lebih kecil dari f_s maka frekuensi yang dihasilkan tidak presisi. Di sisi lain f_s haruslah $\geq 2f$ maksimum untuk menghindari *aliasing* frekuensi di dekat frekuensi yang dicari. *Aliasing* merupakan fenomena munculnya frekuensi yang sama dari hasil transformasi yang mana kita tidak

bisa membedakan antara frekuensi yang asli dengan frekuensi bayangan.

Pada umumnya, transformasi Fourier menggunakan alat yang disebut *real-time spectrum analyzer* yang telah terintegrasi dalam bentuk *chip* untuk menghitung sinyal diskret dalam domain waktu yang berasal dari *microphone*. Untuk dapat menganalisis spektrum frekuensi, di dalam prosessor DSP disusun program *Discrete Fourier Transform* (DFT) (Schuler, 2003: 477).

b) Discrete Fourier Transform (DFT)

Discrete Fourier Transform (DFT) didefinisikan sebagai

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)mn} \quad (2.22)$$

Dengan,

n = indeks dalam domain waktu (0, 1, ..., N-1)

m = indeks dalam domain frekuensi = 0, 1, ..., N-1)

Persamaan ini menyatakan bahwa DFT merupakan metode yang berguna dalam menentukan amplitudo dan komponen-komponen frekuensi harmonik ke- m dari suatu sinyal periodik atau merupakan koefisien-koefisien deret Fourier.

c) Fast Fourier Transform (FFT)

Berawal dari DFT- N data,

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi mn/N)} \quad (2.23)$$

$x(n)$ dipilah menjadi genap dan ganjil sehingga persamaan (2.23) menjadi

$$\begin{aligned} X(m) = & \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) e^{-j(2\pi m(2n)/N)} \\ & + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) e^{-j(2\pi m(2n+1)/N)} \end{aligned}$$

$$X(m) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) e^{-j(2\pi m(2n)/N)} + e^{-j(2\pi m/N)} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) e^{-j(2\pi m(2n)/N)} \quad (2.24)$$

Dengan mendefinisikan $W_N = e^{-j2\pi/N}$, persamaan (2.24) menjadi

$$X(m) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) W_N^{2nm} + W_N^m \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) W_N^{2nm} \quad (2.25)$$

Karena $W_N^2 = e^{-j(2\pi/N)2} = e^{-j(2\pi/(\frac{N}{2}))}$, maka $W_N^2 = W_{\frac{N}{2}}$. Jadi persamaan (2.25) menjadi

$$X(m) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) W_{\frac{N}{2}}^{nm} + W_N^m \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) W_{\frac{N}{2}}^{nm} \quad (2.26)$$

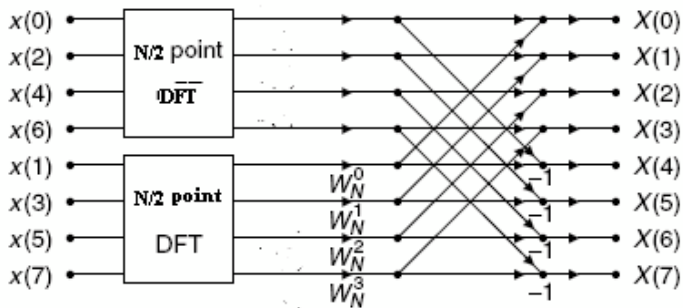
Setelah domain waktu dibagi dua, domain frekuensi juga dibagi menjadi dua yaitu

$$\begin{aligned} X(m + N/2) &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) W_{\frac{N}{2}}^{n(m+\frac{N}{2})} \\ &\quad + W_N^{(m+\frac{N}{2})} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) W_{\frac{N}{2}}^{n(m+\frac{N}{2})} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) W_{\frac{N}{2}}^{nm} + W_N^m \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) W_{\frac{N}{2}}^{nm} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Persamaan (2.26) dan (2.27) merupakan *FFT radix-2 Decimation in Time* (DIT) yang mana *sequence* data dipilah menjadi dua bagian menjadi genap dan ganjil dan menggambarkan

gabungan dua DFT $N/2$ data. Penggunaan sifat periodik dari fungsi kernel membuat perhitungan menjadi lebih efisien karena cukup mengganti tanda operasi menjadi minus.

Secara sederhana persamaan (2.26) dan (2.27) digambarkan menggunakan diagram kupu-kupu (*butterfly diagram*) yaitu:



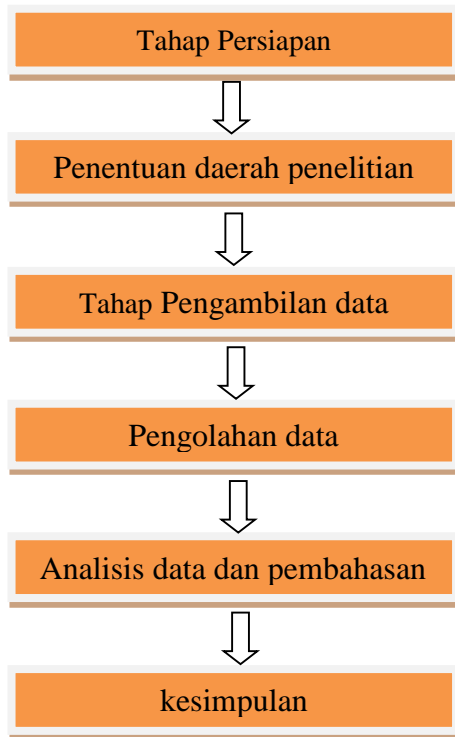
Gambar 2.12. Diagram kupu-kupu (*butterfly diagram*) FFT Radix-2 DIT (*Decimation in Time*). (LiTan, 2008).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada diagram alir berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

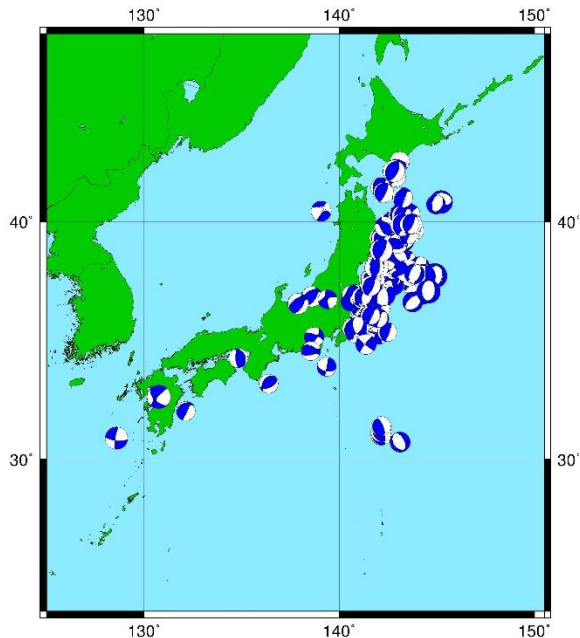
3.2 Tahap Persiapan

Pada tahap ini dilakukan studi literatur untuk mengidentifikasi permasalahan gempa bumi tsunami yang terjadi pada daerah penelitian. Identifikasi tersebut meliputi kondisi geologi daerah

penelitian, pola bidang sesar momen tensor, durasi *rupture* serta karakteristik gempa bumi lain yang dapat memicu tsunami.

3.3 Penentuan Daerah Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan pada gempa bumi yang terjadi di wilayah kepulauan Jepang yang berada pada garis lintang 30° LU - 47° LU dan garis bujur 128° BT - 146° BT.



Gambar 3.2 Peta Kepulauan Jepang (<http://www.fnet.bosai.go.jp/>)

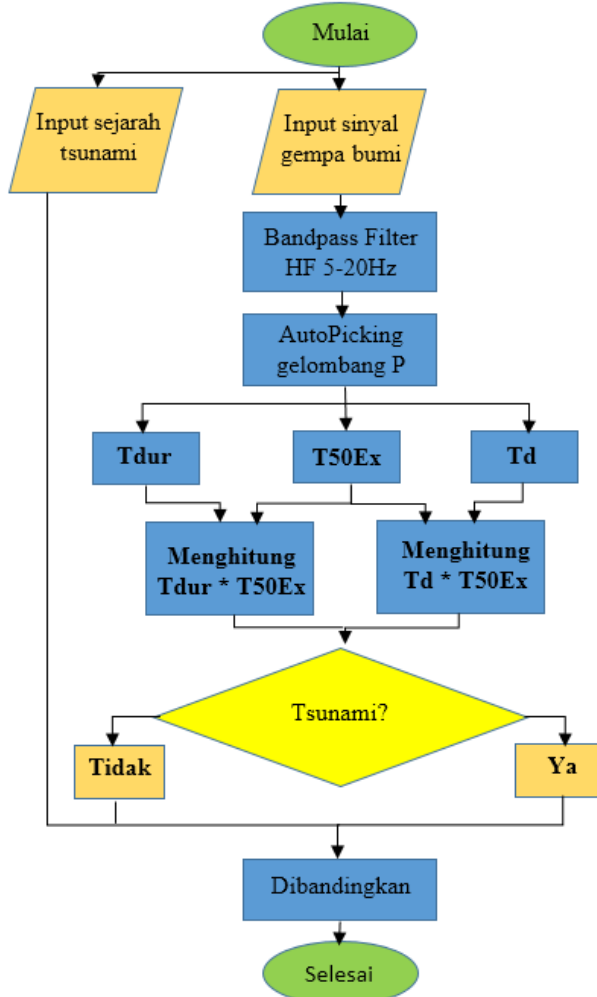
3.4 Data Penelitian

Data gempa bumi yang digunakan adalah data-data gempa bumi yang terjadi pada tahun 2011-2016 dengan magnitudo bodi (m_w) $> 6SR$ yang terjadi di kepulauan Jepang. Data sinyal gempa bumi ini diunduh dari <http://www.fnet.bosai.go.jp/> yang akan

digunakan untuk menentukan durasi *rupture* menggunakan software “Joko Tingkir”.

3.5 Pengolahan Data

Alur pengolahan data dapat dilihat pada diagram alir berikut:

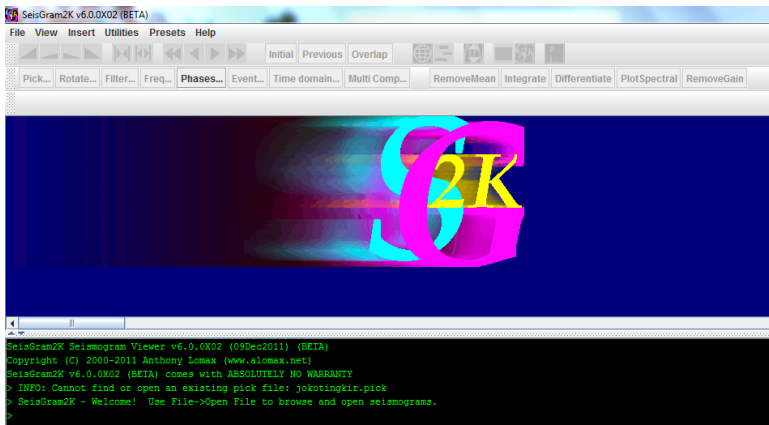


Gambar 3.3 Diagram alir pengolahan data

Pengolahan data dilakukan menggunakan software “Joko Tingkir”. Software tersebut merupakan program komputasi untuk menentukan durasi *rupture* (T_{dur}) gempa bumi untuk mengestimasi terjadinya gempa bumi tsunami

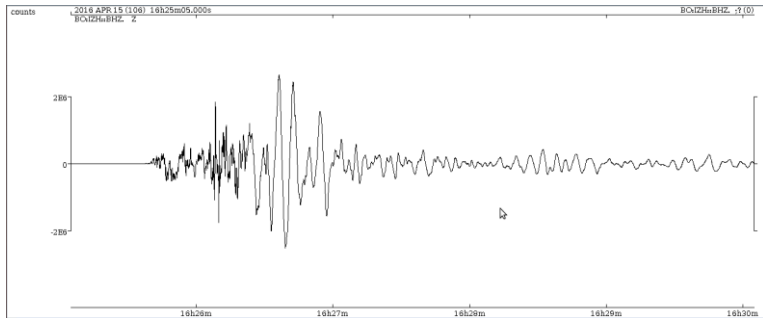
Gambar 3.3 adalah diagram tahapan dalam menggunakan software “Joko Tingkir” untuk mengestimasi durasi *rupture* gempa bumi yang terjadi di kepulauan Jepang pada tahun 2011-2016. Tahap-tahap program “Joko Tingkir” sebagai berikut:

1. Menyiapkan raw data berupa seisgram vertical dalam format .miniseed
2. Membuka software Seisgram2k60.jar (lihat **Gambar 3.4**)



Gambar 3.4 Tampilan dasar seisgram2k60

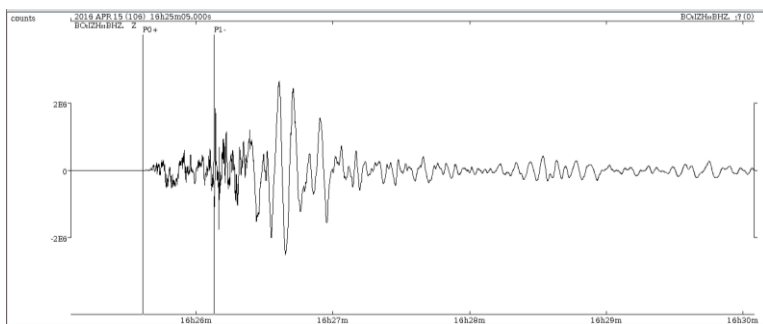
3. Membuka file seismogram dalam format .sac.



Gambar 3.5 Seismogram kecepatan gempa bumi

4. *Picking* awal kedatangan gelombang P (P0)

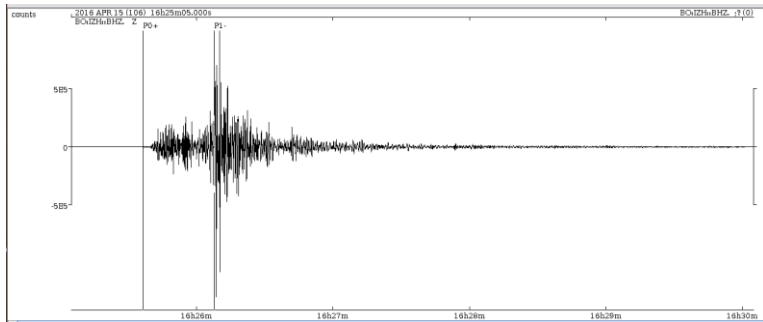
Hasil picking seismogram dapat dilihat pada file `seisgram2k_14778667.pick` yang berada dalam satu directory (folder) dengan software `seisgram2k.jar`, kemudian P0 diubah menjadi P. Pada *command line interaction* ketik “`filp_5 filtw 15.0 ltw 25.0 thres1 10.0 thres2 10.0 tupevt 1.0 res PICK`”.



Gambar 3.6 Picking kedatangan awal gelombang P(Po)

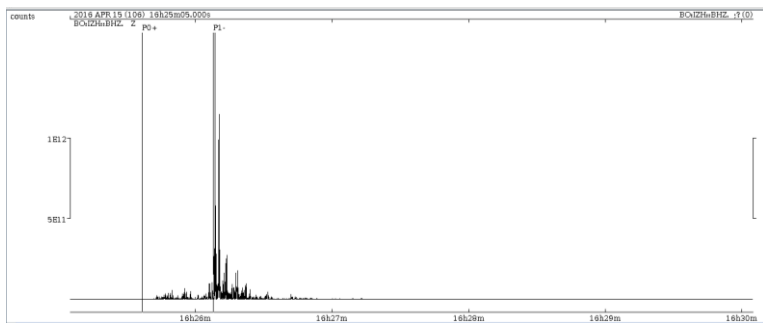
5. Selanjutnya lakukan filter waveform komponen vertical tersebut dengan filter band pass butterworth 5-20 Hz dan menerapkan 4 pole. Hal ini disebabkan gempa bumi yang digunakan adalah gempa bumi regional dengan rekaman

kecepatan *high frequency* pada masing-masing stasiun. Pada *command line interaction* ketik “bp bu co 1 5 n 4”.



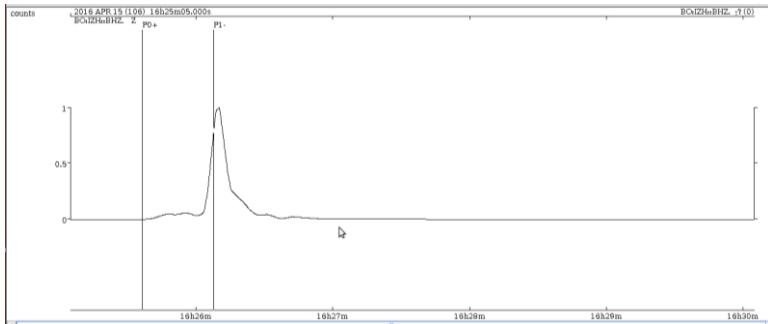
Gambar 3.7 Seismogram difilter dengan frekuensi tinggi

6. Mengkonversi seismogram *high frequency* menjadi *velocity-squared envelopes* untuk mendapatkan rms amplitudo. Pada *command line interaction* ketik “sqr”.



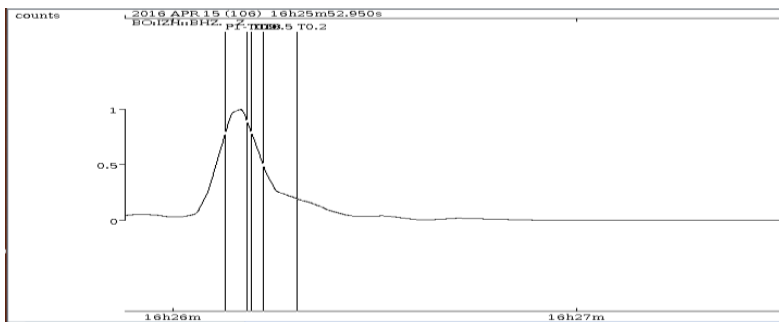
Gambar 3.8 Seismogram yang telah dikuadratkan

7. Seismogram dihaluskan menggunakan *Triangle Smoothing*. Pada *command line interaction* ketik “smo type TRIANGLE ha 5.0”.
8. Seismogram dihilangkan nilai reratanya dan dinormalisasikan. Pada *command line interaction* ketik “rmean lb 20” kemudian “norm”.



Gambar 3.9 Seismogram yang telah dihaluskan dengan *Triangle Smoothing* dan telah dinormalisasi.

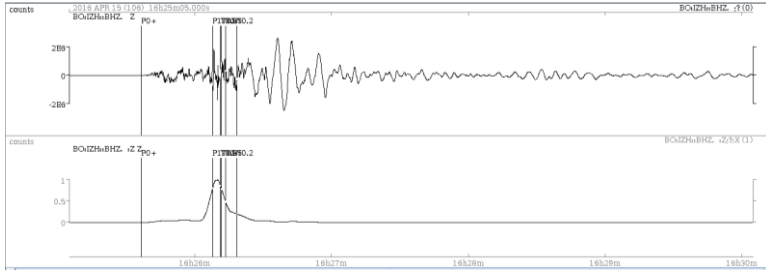
9. Menentukan waktu *delay* setelah kedatangan gelombang P untuk 90% ($T_{0,9}$), 80% ($T_{0,8}$), 50% ($T_{0,5}$), dan 20% ($T_{0,2}$) dari nilai puncaknya yang nilainya dapat dilihat pada file SeisGram2K_1389360856.pick. Pada *command line interaction* ketik “`cdur thres 0.9 cutoff 0.2 durfract 2.5 185.0`” (untuk waktu delay 90%)



Gambar 3.10 *Picking* waktu delay untuk 90% ($T_{0,9}$), 80% ($T_{0,8}$), 50% ($T_{0,5}$), dan 20% ($T_{0,2}$)

10. Menentukan durasi *rupture* (T_{dur}) dengan cara mengubah file SeisGram2K_1389360856.pick menjadi “Joko Tingkir”. Kemudian file script sg2defaults digandakan ke dalam folder

yang sama dengan software SeisGram2K.jar. Setelah itu, diulangi langkah 2 dan 3 kemudian dihitung T_{dur} menggunakan persamaan (3.1). T_{dur} yang digunakan harus memenuhi batas $T_{0.9} < T_{dur} < T_{0.2}$ (Madlazim dan Hariyono, 2014).



Gambar 3.11 Tampilan Akhir Seismogram Dalam Perhitungan T_{dur}

$$T_{dur} = (1 - w)T^{0.9} + wT^{0.2} \quad (3.1)$$

Dengan w adalah $\left[\frac{(T^{0.8} + T^{0.5})}{2} - 20 \right] / 40$ s.

3.6 Analisa data dan Pembahasan

Tahap analisa data dan pembahasan merupakan tahap intepretasi hasil pengolahan data yang telah dilakukan. Analisa data dilakukan pada hasil picking sinyal gempa menggunakan software Seisgram2k60 kemudian diolah menggunakan software “Joko Tingkir”. Hasil pengolahan data menggunakan software “Joko Tingkir” didapatkan nilai durasi *rupture* untuk menentukan apakah gempa bumi tersebut memicu Tsunami atau tidak dengan mempertimbangan parameter-parameter yang didapatkan yaitu durasi *rupture* (T_{dur}), periode dominan (T_d), durasi lebih dari 50 detik (T_{50Ex}) dari gelombang P yang terekam oleh stasiun seismik lokal dengan menggunakan metode prosedur langsung. “Joko Tingkir” juga mengkomputasi perkalian antara T_{dur} dengan T_d dan perkalian antara T_d dengan T_{50Ex} .

3.7 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan hasil pengolahan menggunakan software “Joko Tingkir”, maka dapat ditarik kesimpulan apakah gempa tersebut memicu tsunami atau tidak di kepulauan Jepang.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4. 1 Analisis Data

4.1.1 Data Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini data yang digunakan adalah data gempa bumi yang terjadi di wilayah Jepang pada tahun 2011 sampai dengan april 2016. Data gempa bumi diunduh melalui situs Badan Meteorologi Jepang (JMA) yaitu www.fnet.bosai.go.jp dengan kriteria pencarian *event*, yaitu :

1. Lattitude : 30^0 - 47^0
2. Longitude : 128^0 - 146^0
3. Kedalaman : $<70\text{Km}$
4. Magnitude : 6 - 9.9

Didapatkan 52 event gempa dengan 276 waktu tiba gelombang P. *Event* gempa bumi dapat dilihat pada Lampiran 3.

Lampiran 3 menunjukkan bahwa terjadi banyak gempa bumi dengan magnitudo lebih dari 6 MJ di wilayah kepulauan Jepang namun hanya 11 gempa bumi yang memicu adanya tsunami, yaitu:

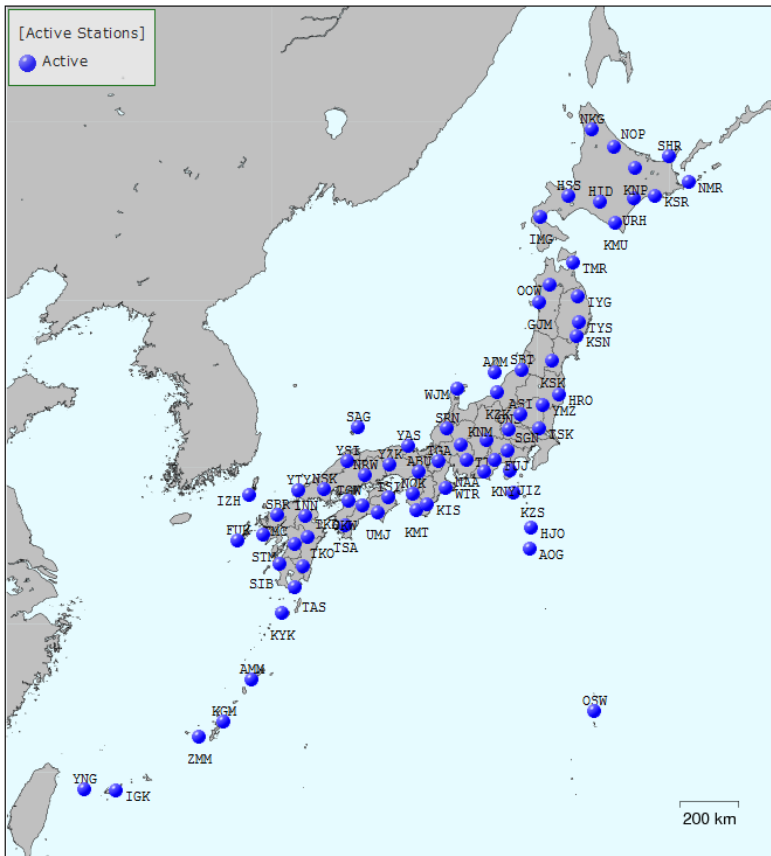
Table 4.1 Gempa bumi yang berpotensi tsunami pada tahun 2011-2016 (NOAA, 2016)

Region Name	Year	Mo	Dy	Hr	Mn	Sec	Lat	Long	Mg
Honshu Island	2011	3	9	2	45	20.3	38.435	142.842	7.5
Honshu Island	2011	3	11	5	46	24.1	38.297	142.372	9
E. Coast Honshu Island	2011	4	7	14	32	43.2	38.276	141.588	7.1
Off East Coast Of Honshu Island	2011	7	10	0	57	10.8	38.034	143.264	7

Hokkaido Island	2012	3	14	9	8	35.1	40.887	144.944	6.9
Off East Coast Of Honshu Island	2012	12	7	8	18	23.1	37.89	143.949	7.2
E. Coast Honshu Island	2013	10	25	17	10	18	37.149	144.679	7.1
Sanriku	2014	7	11	19	21	59	37.04	142.425	6.5
Honshu	2015	2	16	23	6	27	39.83	142.89	6.7
Japan	2015	11	13	20	51	30	30.991	128.877	7.5

Blok warna pada Lampiran 3 dan Tabel 4.1 menunjukkan tsunami dan *event* gempa bumi yang diprediksi menimbulkan tsunami. Warna merah menunjukkan telah terjadi tsunami besar dan merusak, sedangkan warna biru menunjukkan terjadi tsunami yang relatif kecil dan tidak berbahaya.

Data stasiun yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Lampiran 1.



Gambar 4.1. Lokasi Stasiun (www.fnet.bosai.go.jp)

Jumlah stasiun yang digunakan adalah 84 stasiun aktif yang tersebar di kepulauan Jepang. Stasiun-stasiun ini adalah stasiun milik *Japan Meteorological Agency (JMA)*.

4.1.2 Hasil Perhitungan

Tugas akhir ini menggunakan program komputer “Joko Tingkir” yang mampu menghitung parameter-parameter gempa bumi yang dapat digunakan untuk mengestimasi gempa bumi

yang dapat memicu tsunami. Parameter-parameter yang dihitung adalah durasi *rupture* (T_{dur}), periode dominan (T_d), T_{50} Exceedance(T_{50Ex}), $T_d * T_{50Ex}$ dan $T_d * T_{dur}$.

Peringatan potensi tsunami diperoleh dari parameter - parameter potensi tsunami yang melebihi ambang batas yang sudah ditentukan. Batas ambang pada masing-masing parameter tersebut yaitu $T_{dur} > 65$, $T_d > 10$, $T_{50Ex} > 1$, serta $T_d * T_{50Ex} > 10$ dan $T_d * T_{dur} > 650$ (Madlazim 2011a, b, c, d).

Kriteria pada data NOAA untuk mengetahui potensi tsunami atau tidak dengan melihat dari nilai indeks tsunami. Indeks tsunami dihitung dengan Persamaan (2.12). Apabila $I_t < 2$ maka kejadian tersebut tidak berpotensi tsunami, sedangkan $I_t \geq 2$ maka kejadian tersebut berpotensi tsunami. Berikut adalah hasil perhitungan program “Joko Tingkir”.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Joko Tingkir dan Data NOAA

No	Origin Time (UT)	T_{dur} (det)	T_d (det)	T_{50ex} (det)	$T_d * T_{50ex}$ (det ²)	$T_{dur} * T_{50ex}$ (det ²)	J T	I_t	N O A A
1	2011/03/09 02:45:12.97	147.1	9.39	33.68	119.564	2574.84	T	2	T
2	2011/03/11 05:46:18.12	200	15.64	64.46	929.513	11825.2	T	24	T
3	2011/04/07 14:32:43.43	122.3	3.25	3.59	4.5	373.899	nT	1	nT
4	2011/06/03 00:05:02.77	68.16	2.8	2.32	2.6912	115.072	nT	0	nT
5	2011/06/14 13:06:52.81	121.95	2.28	6.35	5.715	523.875	nT	0	nT
6	2011/06/18 11:31:04.61	115.65	2.43	2.93	2.2268	264.286	nT	0	nT
7	2011/06/22 21:50:50.73	88.796	2.8587	1.5481	2.18226	116.771	nT	0	nT
8	2011/07/10 00:57:07.36	129.65	5.65	0.85	2.33	65.67	nT	1	nT
9	2011/07/23 04:34:23.87	101.85	6.22	0.32	0.7464	32.592	nT	0	nT

10	2011/07/24 18:51:25.30	130.5	3.04	0.46	1.2972	41.76	nT	0	nT
11	2011/07/30 18:53:50.64	128.9	6.51	2.5	4.475	322.25	nT	0	nT
12	2011/08/01 14:58:11.07	118.45	3.19	0.26	0.689	30.797	nT	0	nT
13	2011/08/11 18:22:04.71	99.1	3.01	2.47	1.6796	197.353	nT	0	nT
14	2011/08/17 11:44:08.67	108.2	4.48	5.92	7.992	399.718	nT	0	nT
15	2011/08/19 05:36:31.61	128.35	4.22	0.29	0.9336	36.8039	nT	0	nT
16	2011/08/22 11:23:35.34	75.85	6.11	0.05	0.2225	2.2725	nT	0	nT
17	2011/09/15 08:00:08.62	111.44	6.44	1.69	2.704	132.242	nT	0	nT
18	2011/09/16 19:26:35.86	103.31	2.5792	2.2128	3.34724	176.390	nT	0	nT
19	2011/09/16 21:08:02.54	78.258	1.7486	1.347	1.21463	86.7221	nT	0	nT
20	2011/11/23 19:24:30.45	88.95	11.12	0.39	3.0024	31.0245	nT	0	nT
21	2011/11/24 10:25:33.75	115.2	3.01	1.98	2.772	228.096	nT	0	nT
22	2012/02/14 06:21:59.53	128.65	4.04	1.75	4.8125	141.137	nT	0	nT
23	2012/03/14 09:08:33.09	114.15	8.92	1.35	5.778	91.4085	nT	1	nT
24	2012/03/14 10:49:23.16	109.9	2.62	7.98	6.384	444.964	nT	0	nT
25	2012/03/14 12:05:04.32	110.3	3.48	3.08	5.8212	339.724	nT	0	nT
26	2012/03/27 11:00:42.44	137.5	3.34	0.34	0.6392	46.75	nT	0	nT
27	2012/04/13 10:10:00.37	103.05	5.96	0.38	2.2648	38.323	nT	0	nT
28	2012/05/19 19:05:17.56	66.424	2.25	3.0525	3.95968	207.147	nT	0	nT
29	2012/05/20 07:20:33.75	199.45	5.08	3.31	4.2368	330.834	nT	0	nT
30	2012/05/23	74.37	2.01	2.46	2.583	156.357	nT	0	nT

	15:02:26.59								
31	2012/06/05 19:31:33.33	126.35	3.52	1.89	3.4776	152.919	nT	0	nT
32	2012/06/17 20:32:20.81	107.25	3.74	0.29	0.5236	31.1025	nT	0	nT
33	2012/08/25 14:16:17.44	67.57	2.13	0.02	0.0228	1.3514	nT	0	nT
34	2012/10/01 22:21:42.63	81.077	1.9133	3.1869	5.37566	299.590	nT	0	nT
35	2012/12/07 08:18:20.28	65.79	3.07	1.6137	1.94513	99.4370	nT	2	T
36	2012/12/07 08:31:10.24	52.47	7.95	0.81	1.1421	39.2931	nT	0	nT
37	2013/02/25 07:23:53.58	95.55	7.12	0.74	2.701	47.2268	nT	0	nT
38	2013/04/01 18:53:15.74	115.65	6.85	1.04	2.9376	99.06	nT	0	nT
39	2013/04/12 20:33:17.75	90.1	3.74	0.78	2.5702	66.495	nT	0	nT
40	2013/04/17 08:57:34.37	46.26	6.44	0.01	0.0644	0.3993	nT	0	nT
41	2013/10/25 17:10:18.39	59.568	1.976	3.988	4.61156	266.995	nT	1	nT
42	2014/07/11 19:22:00.44	81.825	5.5475	1.7325	9.66443	182.334	nT	1	nT
43	2014/12/20 09:29:57.87	123.7	4.11	0.2	0.822	24.74	nT	0	nT
44	2015/02/16 23:06:34.68	93.613	3.669	1.9837	2.75217	160.117	nT	2	T
45	2015/02/20 04:25:20.99	123.7	4.65	2.06	5.49	254.82	nT	0	nT
46	2015/02/21 10:13:51.88	123.7	4.65	2.06	5.49	254.82	nT	0	nT
47	2015/02/25 07:00:59.32	68.89	5.35	0.42	2.56	30.04	nT	0	nT
48	2015/05/10 21:25:44.84	96.072	7.2425	0.4306	2.70982	42.577	nT	0	nT
49	2015/05/12 21:12:58.45	107.45	5.22	1.36	1.6048	135.388	nT	0	nT
50	2015/05/30 18:49:06.29	141.6	1.58	7.92	6.0984	565.092	nT	0	nT

51	2015/09/01 15:25:10.23	119.01	6.1030	0.3361	1.79786	33.8514	nT	0	nT
52	2015/11/13 20:51:30.11	73.391	8.6828	0.9057	4.48516	75.8269	nT	1	nT

Berdasarkan data hasil perhitungan cepat program “Joko Tingkir” diketahui bahwa nilai durasi *rupture* (T_{dur}), periode dominan (T_d) Dan *T50 Exceedance* (T_{50Ex}) bervariasi. Nilai T_{dur} bervariasi antara 2.9 – 200. Nilai t_d bervariasi antara 0.49 - 55. Nilai T_{50Ex} bervariasi antara 0.01 – 64.46. Nilai perkalian T_d dan T_{50ex} bervariasi antara 0.085 – 929.513 dan nilai perkalian antara T_{dur} dan T_{50Ex} bervariasi antara 0.214 - 11825.2.

Gempa bumi yang memiliki nilai T_{dur} , T_d dan T_{50ex} serta hasil perkalian terbesar adalah gempa bumi Tohoku-Oki di pulau Honshu yang memicu gelombang tsunami pada 11 maret 2011 yaitu 200 (T_{dur}), 15.64 (T_d), 64.46 (T_{50Ex}), 929.513 ($T_d * T_{50Ex}$) dan 11825.2 ($T_{dur} * T_{50Ex}$). Tsunami tersebut merupakan bencana yang sangat besar dengan korban tewas mencapai 18.000 orang (NOAA, 2011).

4.2 Pembahasan

Program komputer “Joko Tingkir” yang dikembangkan oleh Prof. Dr Madlazim, M.Si (Madlazim, 2011b) merupakan salah satu upaya mitigasi bencana tsunami. Program ini mampu menghitung dan memberi keputusan dengan cepat dan akurat dalam menentukan apakah gempa bumi yang terjadi akan memicu tsunami atau tidak.

Pengambilan keputusan bergantung pada nilai parameter-parameter yang hitung oleh program “Joko Tingkir”. Terdapat 5 parameter yang dihitung sebagai dasar pengambilan keputusan, yaitu durasi *rupture* (T_{dur}), periode dominan, periode lebih dari 50 detik (T_{50Ex}) serta perkalian antara periode *rupture* dan periode lebih dari 50 detik ($T_d * T_{50Ex}$) dan perkalian antara periode dominan dan periode lebih dari 50 detik ($T_{dur} * T_{50Ex}$). Perkalian $T_d T_{50ex}$ dan $T_{dur} T_{50ex}$ dapat memberikan gambaran

tentang luas *rupture* akibat gempa bumi yang mampu memicu terjadinya tsunami.

Program komputer “Joko Tingkir” bekerja menggunakan bahasa pemrograman “Bash” yang ada pada sistem linux. Program “Joko Tingkir” membutuhkan software pendukung yaitu seisgram2k yang digunakan untuk membuka sinyal gelombang yang diperoleh dari Badan Meteorologi Jepang sebagai raw data yang selanjutnya sinyal tersebut difilter menggunakan filter Butterworth 1-5 Hz sehingga didapatkan sinyal frekuensi tinggi. Setelah itu, nilai RMS (*root mean square*) dari amplitudo dihitung dengan cara mengkonversi seismogram HF tersebut menjadi *velocity-squared envelopes*. Waktu kedatangan gelombang P dari rekaman seismogram yang telah difilter selanjutnya *dipicking* secara otomatis dengan software Seisgram2k. Keterlambatan waktu kedatangan (*delay*) gelombang P diukur pada 90% ($T^{0.9}$), 80% ($T^{0.8}$), 50% ($T^{0.5}$), dan pada 20% dari nilai puncaknya ($T^{0.2}$). Terakhir, nilai Tdur atau waktu durasi dari beberapa gempa bumi di daerah dengan karakteristik tektonik yang berbeda dihitung dengan rumusan tertentu (Madlazim, 2013).

Hasil perhitungan cepat program ”Joko Tingkir” pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa program “Joko Tingkir” mampu mengestimasi gempa bumi yang memicu tsunami. Program ”Joko Tingkir” mengolah sinyal gempa bumi yang didapatkan dari seismometer dan mendapatkan 5 nilai parameter. 5 parameter tersebut adalah *durasi rupture* (Tdur), periode dominan (Td), periode lebih dari 50 detik (T50Ex), dan perkalian TdurT50ex serta perkalian TdT50Ex yang didapatkan dari sinyal gempa bumi berpotensi tsunami yang terjadi di Jepang (http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml), yaitu tsunami pada Nopember 2015, tsunami Juli 2014, tsunami Oktober 2013, tsunami Desember 2012, dan 2 tsunami pada Maret 2011. Tsunami pada bulan maret ini terdiri dari tsunami kecil pada tanggal 9 dan mega tsunami pada tanggal 11. Pada gempa bumi 11 maret 2011 yang menyebabkan tsunami besar terlihat bahwa program joko tingkir dapat mengestimasi nilai parameter-parameter dengan jelas.

Pada gempa bumi ini, semua parameter berada jauh diatas nilai kritisnya. sedangkan pada gempa bumi tsunami yang lain terlihat bahwa nilai parameter *rupture* didominasi oleh nilai yang telah melebihi nilai kritisnya.

Program "Joko Tingkir" mampu memberikan nilai yang akurat dalam proses penentuan gempa bumi yang memicu tsunami. Hal ini terbukti bahwa "Joko Tingkir" mampu menunjukkan data yang sama dengan histori NOAA secara cepat dan tepat pada 50 *event* dari 52 *event* yang terjadi di Jepang pada tahun 2011-2016. Sehingga dapat dikatakan keakuratan program "Joko Tingkir" mencapai 96.15% sesuai dengan data NOAA dalam mendeteksi gempa bumi yang menimbulkan tsunami.

"Joko Tingkir" mengalami kegagalan dalam menentukan 2 *event* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data 35 dan 44 (lihat blok gelap pada Tabel 4.3). Pada data 35 dan 44, program "Joko Tingkir" tidak menunjukkan nilai diatas nilai kritis pada parameter T_d , $T_d * T_{50Ex}$ dan $T_{dur} * T_{50Ex}$. Hal ini disebabkan tsunami yang dibentuk oleh gempa bumi tersebut kecil dan tidak berbahaya. Ketinggian maksimum yang dibentuk tsunami tersebut hanya mencapai 0.2 meter (NOAA, 2011). Selain itu, hal ini disebabkan program "Joko Tingkir" tidak memperhitungkan pola pensesaran yang terjadi. Program "Joko Tingkir" hanya mengestimasi dimensi *rupture* yang disebabkan oleh gempa bumi (Lomax dan Mechelini, 2011). Menurut Masturiono (2012), terdapat kesulitan dalam menentukan batas-batas kriteria gempa bumi yang menimbulkan tsunami sehingga dibutuhkan *sense* ilmiah dari para operator yang menjalankan survei operasional.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 1

Tabel 1. Daftar stasiun yang digunakan

No	Nama Stasiun	Kode	Latitud	Longitud	Altitud
1	Abuyama	ABU	34.8635N	135.5706E	137m
2	Akadomari	ADM	37.9046N	138.4303E	275m
3	Amamioshima	AMM	28.1571N	129.3001E	12m
4	Aogashima	AOG	32.4508N	139.7740E	84m
5	Ashio	ASI	36.6342N	139.4206E	663m
6	Choshi	CHS	35.7055N	140.8517E	52m
7	Fujigawa	FUJ	35.2307N	138.4181E	618m
8	Fukue	FUK	32.7177N	128.7572E	75m
9	Gojome	GJM	39.9555N	140.1113E	105m
10	Hidaka	HID	42.8208N	142.4145E	228m
11	Hachijo	HJO	33.1048N	139.8024E	87m
12	Honkawane	HKW	35.0965N	138.1349E	449m
13	Hirono	HRO	37.2246N	140.8777E	615m
14	Sapporo	HSS	42.9672N	141.2286E	220m
15	Ishigaki	IGK	24.4131N	124.1808E	77m
16	Imakane	IMG	42.3928N	140.1406E	50m
17	Nakatsu	INN	33.4701N	131.3062E	168m
18	Tokushima	ISI	34.0606N	134.4554E	27m
19	Iwatsuki	IWT	35.9290N	139.7349E	6m
20	Yamagata	IYG	40.1217N	141.5833E	427m
21	Izuhara	IZH	34.1359N	129.2066E	384m
22	Nakaizu	JIZ	34.9167N	138.9938E	263m
23	Kofu	KFU	35.7426N	138.5658E	590m
24	Kunigami	KGM	26.7567N	128.2153E	102m
25	Kiwa	KIS	33.8652N	135.8907E	66m

26	Kamitonda	KMT	33.6782N	135.4899E	152m
27	Kamikineusu	KMU	42.2391N	142.9625E	177m
28	Kanayama	KNM	35.7168N	137.1781E	338m
29	Kunneppu	KNP	43.7625N	143.7084E	158m
30	Kanaya	KNY	34.8738N	138.0628E	258m
31	Kawasaki	KSK	38.2585N	140.5833E	318m
32	Kesennuma	KSN	38.9762N	141.5301E	260m
33	Kushiro	KSR	42.9820N	144.4851E	17m
34	Nagata	KYK	30.3781N	130.4099E	310m
35	Kashiwazaki	KZK	37.2977N	138.5143E	250m
36	Kozushima	KZS	34.2056N	139.1485E	191m
37	Minmaya	MMA	41.1619N	140.4107E	80m
38	Asahi	NAA	35.2239N	137.3622E	200m
39	Nakagawa	NKG	44.8017N	142.0849E	30m
40	Nemuro	NMR	43.3673N	145.7379E	20m
41	Nokami	NOK	34.1656N	135.3478E	94m
42	Nishiokoppe	NOP	44.3218N	142.9384E	125m
43	Nariwa	NRW	34.7682N	133.5325E	199m
44	Nishiki	NSK	34.3403N	132.0018E	211m
45	Oosuka	OHS	34.6858N	138.0122E	68m
46	Ookawa	OKW	33.8272N	133.4691E	827m
47	Onishi	ONS	36.1557N	138.9822E	478m
48	Owani	OOW	40.4689N	140.5097E	205m
49	Ogasawara	OSW	27.0983N	142.1961E	11m
50	Saigo	SAG	36.2553N	133.3050E	70m
51	Sefuri	SBR	33.5052N	130.2530E	260m
52	Shibata	SBT	37.9683N	139.4501E	130m
53	Turusugeno	SGN	35.5096N	138.9444E	785m
54	Shari	SHR	44.0563N	144.9944E	110m

55	Shibisan	SIB	31.9698N	130.3486E	655m
56	Shimizu	SMZ	34.9904N	138.5136E	0m
57	Shiramine	SRN	36.2018N	136.6303E	472m
58	Sotome	STM	32.8870N	129.7237E	144m
59	Tashiro	TAS	31.1946N	130.9093E	504m
60	Taga	TGA	35.1847N	136.3383E	297m
61	Tamagawa	TGW	33.9734N	132.9319E	299m
62	Takakuma	TKA	31.5160N	130.7830E	535m
63	Takeda	TKD	32.8179N	131.3875E	749m
64	Takaoka	TKO	31.8931N	131.2321E	88m
65	Tomochi	TMC	32.6063N	130.9151E	283m
66	Tomari	TMR	41.1016N	141.3831E	120m
67	Nakagawa	TNK	44.7779N	142.0791E	60m
68	Tenryu	TNR	34.9111N	137.8822E	140m
69	Nishitosa	TSA	33.1781N	132.8200E	141m
70	Tsukuba	TSK	36.2141N	140.0898E	173m
71	Takato	TTO	35.8363N	138.1209E	1149m
72	Tateyama	TYM	34.9745N	139.8449E	22m
73	Tonoyamasaki	TYS	39.3772N	141.5932E	346m
74	Umaji	UMJ	33.5795N	134.0367E	361m
75	Uraoro	URH	42.9298N	143.6711E	80m
76	Wajima	WJM	37.4021N	137.0257E	200m
77	Watarai	WTR	34.3739N	136.5748E	94m
78	Yasaka	YAS	35.6570N	135.1605E	231m
79	Yamizo	YMZ	36.9267N	140.2445E	520m
80	Yonaguni	YNG	24.4550N	123.0070E	83m
81	Yoshida	YSI	35.1942N	132.8862E	385m
82	Toyota	YTY	34.2835N	131.0364E	155m
83	Yamasaki	YZK	35.0888N	134.4594E	329m

84	Zamami	ZMM	26.2328N	127.3038E	21m
-----------	--------	-----	----------	-----------	-----

63

questions

ISUMMI Events where (Year <= 2010 and Year >= 2011) and Region Name = 83 and Country = JAPAN

view parameters descriptions and access statistical information by clicking on column headings.

click on the links in the Earthquake Mag, Volcano, Addl Tsu Info, or Num. of Runups columns.

Tsunami Cause										Tsunami Source Location										Tsunami Parameters					Tsunami Effects				
Date										Earth-quake										Max Water Height					House Destroyed				
Year	Mo	Dy	Hr	Min	Sec	Val	Code	quake mag	Wit- cano	Add info	Densits	Country	Name	Latitude	Longitude	Height	Num. of	Island	Foots	Injures	Damage	House Destroyed	House Damaged	Photos					
2011	3	9	2	45	03.4	1	7.5	*	*			JAPAN	HONSHU ISLAND	38.453	142.942	.60	11		18457	4	6152	4	22005.656	4	12751.1	4	27279.6		
2011	3	11	5	46	24.4	1	9.0	*	*	2		JAPAN	HONSHU ISLAND	38.297	142.717	38.88	6280												
2011	4	7	14	32	43.2	4	1	7.0	*			JAPAN	E. COAST HONSHU ISLAND	38.716	141.338	.09	1												
2011	7	10	0	57	10.8	4	1	7.0	*	*		JAPAN	OFF EAST COAST OF HONSHU ISLAND	38.104	142.364	.08	1												
2012	3	14	6	8	53.1	4	6.9	*	*			JAPAN	HOKKAIDO ISLAND	40.887	144.944	.20	2												
2012	12	7	8	18	23.1	4	7.2	*	*			JAPAN	OFF EAST COAST OF HONSHU ISLAND	37.890	143.949	1.00	3												
2013	10	26	17	10	18.0	4	7.1	*	*			JAPAN	E. COAST HONSHU ISLAND	37.148	144.675	.09	2												
2014	7	11	19	21	59.0	4	6.5	*	*			JAPAN	SHANSHU	37.046	142.425	.20	2												
2015	2	16	59	46.0	3	1	5.2	*	*			JAPAN	HONSHU	38.830	142.990	.09	1												
2015	5	2	16	59	46.0	3	1	5.2	*	*		JAPAN	S. OF HONSHU ISLAND	31.354	140.167	.30	1												
2015	11	12	20	57	30.0	4	6.7	*	*			JAPAN		30.991	138.877	.30	1												

DHA > NESDIS > NOAA (formerly NGDC) > Natural Hazards

[Home](#) | [Contact Us](#) | [Data](#) | [Disclaimers](#) | [Education](#) | [News](#) | [Privacy Policy](#) | [Site Map](#) | [Take Our Survey](#)

Questions: haz.moh@nasa.gov

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 3

Tabel 1. Data *event* yang terjadi di Jepang

No	Origin_Time (UT)	Latitude (°)	Longitude (°)	JMA_Depth (km)	JMA Magnitude(MJ)
1	2011/03/09 02:45:12.97	38.3285	143.2798	8.28	7.3
2	2011/03/11 05:46:18.12	38.1035	142.861	23.74	9
3	2011/04/07 14:32:43.43	38.2028	141.9237	65.73	7.1
4	2011/06/03 00:05:02.77	37.3025	143.8332	57	6.1
5	2011/06/14 13:06:52.81	37.8117	143.5827	50	6
6	2011/06/18 11:31:04.61	37.6177	141.8213	27.65	6
7	2011/06/22 21:50:50.73	39.9478	142.5908	36.4	6.9
8	2011/07/10 00:57:07.36	38.0318	143.5067	34	7.3
9	2011/07/23 04:34:23.87	38.8737	142.0912	47.16	6.4
10	2011/07/24 18:51:25.30	37.7087	141.6267	45.81	6.3
11	2011/07/30 18:53:50.64	36.9032	141.2213	57.31	6.5
12	2011/08/01 14:58:11.07	34.7085	138.5477	22.79	6.2
13	2011/08/11 18:22:04.71	36.9688	141.161	52.26	6.1
14	2011/08/17 11:44:08.67	36.7687	143.7637	52	6.2
15	2011/08/19 05:36:31.61	37.649	141.7967	51.15	6.5
16	2011/08/22 11:23:35.34	36.1072	141.984	34	6.1
17	2011/09/15 08:00:08.62	36.2553	141.4833	50.88	6.3
18	2011/09/16 19:26:35.86	40.2592	143.0862	7.4	6.6
19	2011/09/16 21:08:02.54	40.2473	143.2128	3.69	6.1
20	2011/11/23 19:24:30.45	37.3302	141.6127	45.41	6.1
21	2011/11/24 10:25:33.75	41.7503	142.8873	43.21	6.2

22	2012/02/14 06:21:59.53	36.2167	141.597	54.22	6
23	2012/03/14 09:08:33.09	40.7753	145.2275	64	6.9
24	2012/03/14 10:49:23.16	40.6812	144.9673	68.79	6
25	2012/03/14 12:05:04.32	35.7477	140.932	15.08	6.1
26	2012/03/27 11:00:42.44	39.8063	142.3338	20.5	6.6
27	2012/04/13 10:10:00.37	36.9472	141.4223	31.54	6
28	2012/05/19 19:05:17.56	39.6988	143.6807	33	6
29	2012/05/20 07:20:33.75	39.5372	143.6212	7	6.5
30	2012/05/23 15:02:26.59	41.3437	142.1237	59.6	6.1
31	2012/06/05 19:31:33.33	34.9927	141.3707	37.02	6.3
32	2012/06/17 20:32:20.81	38.8747	142.091	46.79	6.2
33	2012/08/25 14:16:17.44	42.3278	143.1107	49.1	6.1
34	2012/10/01 22:21:42.63	39.8328	143.5205	22.48	6.3
35	2012/12/07 08:18:20.28	37.8158	144.3153	46	7.4
36	2012/12/07 08:31:10.24	37.9198	143.8557	30	6.6
37	2013/02/25 07:23:53.58	36.8737	139.4128	2.84	6.3
38	2013/04/01 18:53:15.74	39.5053	143.5183	28.72	6.2
39	2013/04/12 20:33:17.75	34.4188	134.829	14.85	6.3
40	2013/04/17 08:57:34.37	34.0473	139.353	9.37	6.2
41	2013/10/25 17:10:18.39	37.1963	144.5687	56	7.1
42	2014/07/11 19:22:00.44	37.05	142.3208	33	7
43	2014/12/20 09:29:57.87	37.4253	141.606	44.4	6
44	2015/02/16 23:06:34.68	39.8723	143.1927	12.72	6.9
45	2015/02/20	39.9127	143.7322	8.04	6.5

	04:25:20.99				
46	2015/02/21 10:13:51.88	39.8948	143.61	11.22	6.4
47	2015/02/25 07:00:59.32	31.089	142.137	44	6.1
48	2015/05/10 21:25:44.84	31.2318	142.146	10	6.3
49	2015/05/12 21:12:58.45	38.8628	142.1502	46.24	6.8
50	2015/05/30 18:49:06.29	30.7745	143.1283	45	6.6
51	2015/09/01 15:25:10.23	31.4665	142.141	57	6.1
52	2015/11/13 20:51:30.11	30.9432	128.59	17	7.1

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan didapat kesimpulan sebagai berikut

1. Benar nilai parameter-parameter rupture gempa bumi di Jepang pada tahun 2011-2016, yaitu;
Durasi rupture (T_{dur}) : 2.9 – 200 detik
Periode Dominan : 2.9 – 70.02 detik
 T_{50} Exceedance : 0.49 – 55 detik
 $T_d * T_{50Ex}$: 0.085 – 929.513 detik²
 $T_{dur} * T_{50Ex}$: 0.0214 – 11825.2 detik²
2. Keakuratan program joko tingkir mencapai 96.15% terhadap data NOAA.

5.2 Saran

Adapun saran yang bisa diberikan mengenai penulis dalam penelitian ini adalah perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penentuan gempa bumi tsunami menggunakan program Joko Tingkir yaitu tampilan program “Joko Tingkir” harus lebih interaktif serta memperbanyak jumlah event gempa bumi yang diteliti sehingga mengetahui kekurangan lain dari program “Joko Tingkir”.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Diposaptono, S., Budiman, 2006. Tsunami. ITB, Bandung.
- Geist, E. dan Yoshioka, S., 1996. Source Parameters Controlling the Generation and Propagation of Potential Local Tsunamis. *Natural Hazards* 13: 151-177.
- Ibad, M.I., Santosa, B.J., 2014. Pemodelan Tsunami Berdasarkan Parameter Mekanisme Sumber Gempa Bumi Dari Analisis Waveform Tiga Komponen Gempa Bumi Mentawai 25 Oktober 2010. *J. Sains Dan Seni ITS* 3, B86–B91.
- Khoiridah, S., Santosa, B.J., 2014. Estimasi Centroid Moment Tensor (CMT), Bidang Sesar, Durasi Rupture, dan Pemodelan Deformasi Vertikal Sumber Gempa Bumi sebagai Studi Potensi Bahaya Tsunami di Laut Selatan Jawa. *J. Sains Dan Seni ITS* 3, B74–B79.
- Lomax, A. & Michelini, A., 2009. Tsunami early warning using earthquake rupture duration. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09306, doi:10.1029/2009GL037223.
- Lomax, A. and A. Michelini, 2011. Tsunami early warning using earthquake rupture duration and P-wave dominant period: the importance of length and depth of faulting, *Geophys. J. Int.* 185, 283-291, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04916.x.
- Lomax, A. and A. Michelini (2012), Tsunami earlywarning within 5 minutes, *Pure and Applied Geophysics*, 169, nnn-xxx, doi: 10.1007/s00024-012-0512-6
- Madlazim (2011a), Toward Indonesian Tsunami Early Warning System by Using Rapid Rupture Duration

Calculation, Science of Tsunami Hazards, Vol 30, No. 4, Tsunami Society International, USA.

Madlazim (2011b), Menuju Sistem Peringatan Dini Tsunami Menggunakan Perhitungan Durasi Rupture Gempabumi secara Cepat dan Tepat, Edisi 3, 2011, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).

Madlazim, (2011c), Estimasi Durasi, Arah dan Panjang Rupture, serta Lokasi Lokasi Gempabumi Susulan Menggunakan Perhitungan Cepat, Jurnal *Prosiding Seminar Tahunan Hasil-Hasil Penelitian dan Pengembangan Puslitbang BMKG Tahun 2012*, Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA), Vol 2, No. 2.

Madlazim (2011d) Toward tsunami early warning system in Indonesia 3 minutes, Seminar Ilmiah Bulanan BMKG "Scientific Journal Club", Jakarta 28 November 2011.

Madlazim, Hariyono, E., 2014. Joko Tingkir program for estimating tsunami potential rapidly. pp. 57–59. doi:10.1063/1.4897103

Madlazim, M., Santosa, B.J., Utama, W., 2010. Three Components Seismogram Analysis of Tasikmalaya, Indonesia on September 2nd 2009 Earthquake to Investigate the Coulomb Stress Change and Seismicity Rate Change. *Indones. J. Phys.* 21, 71–76.

Mahardika, depta, Santosa, B.J., 2014. ITS-paper-39680-1110100032-paper (1).pdf.

Masturyono. 2013. Validation of “Joko Tingkir” In The Real Time Tsunami Warning System: A Preliminary Result. *In the 3rd International Symposium on Earthquake and Disaster Mitigation*, Yogyakarta

- Masturyono, Hardy, t., Madlazim. 2012. Desain Sistem Penentuan Tsunami Menggunakan: Rupture Duration (Tdur), Time Dominan (Td) dan T50Ex. Prosiding Seminar Tahunan Hasil-Hasil Penelitian dan Pengembangan Puslitbang BMKG, Jakarta.
- Minoura, K., Imamura, F., Sugawara, D., Kono, Y., Iwashita, T., 2001. The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan.
- Muhari, A., Gusman, A.R., 2011. Sejarah Kejadian dan Penanganan Gempa dan Tsunami di Jepang.
- NIED. 2016. National Research Institute for Earth Science and Disaster. earthquake glossary. diunduh pada tanggal 9 april 2016.
- Resilience <http://www.fnet.bosai.go.jp/event/search.php?LANG=en>
- NOAA. 2011. National Oceanic and Atmospheric Administration. (November 03, 2009C 17:06:01 UTC). Tsunami Glossary – Tsunami wave. Di unduh Pada tanggal 20 Mei 2016, http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml
- Rahmawan, S., Gunawan, I., Muhamad, A., 2012. Stud Potensial Bahaya Tsunami Di Selatan Jawa. Fak. Imu Dan Teknol. Kebumihan Program Studi Meteorol. ITB.
- Sapiie, B., Natawidjaja, D., Cloos, M., 1999. Strike-Slip Tectonics of New Guinea: Transform Motion between the Caroline and Australian Plates. Developments in Indonesian Tectonics and Structural Geology. Proc. Indones. Assoc. Geol. 28th Annu. Conv. Jkt. I, 1–5.

- Simonoff, Jeffrey S. (1998) *Smoothing Methods in Statistics*, 2nd edition. Springer [ISBN 978-0387947167](#)
- Tatsuo, U., 1979. Study of Historical Earthquakes in Japan.pdf.
- UNESCO, 2006. Tsunami Glossary.
- USGS, 2016. The Pasific Ring of Fire [WWW Document]. Pasific Ring Fire. URL www.usgs.org
- USGS. 1999. United States Geological Survey. (November 03, 2009C 17:06:01 UTC). Earthquake Glossary – seismic wave. Di unduh Pada tanggal 15 Mei 2016, <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=seismic%20wave>.
- Wegener, A., 2002. The origins of continents. Int. J. Earth Sci. 91, s4–s17. doi:10.1007/s00531-002-0271-1
- Weinberg MD., 1991. A search for instability in two families of spherical stellar models. The Astrophysical Journal. 1991;368:66–78.
- Wifayanti, E.J., Santosa, B.J., 2014. Estimasi Pola Bidang Sesar dan Moment Tensor Gempa Bumi Jepang pada Tahun 2003 Menggunakan Analisis Inversi Waveform 3 Komponen. J. Sains Dan Seni ITS 3, B126–B131.
- Yatimantaro, T., 2013. Determination of Slip Distribution of the 28 March 2005 Nias Earthquake Using Join Inversion of Tsunami Waveform and GPS Data. Bull. IISSE 47, 115–120.

BIODATA PENULIS



Penulis adalah mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Penulis memiliki minat dalam bidang pendidikan dan keilmuan khususnya terhadap dunia riset dan teknologi yang sedang berkembang saat ini. Pada tahun 2010, penulis menjadi juara 3 olimpiade Fisika tingkat SMA yang di selenggarakan Primagama Sidoarjo. Pada 2011, menjadi wakil sidoarjo dalam OSN tingkat provinsi yang diselenggarakan di hotel Semut Surabaya. Selanjutnya saat menjadi mahasiswa ITS, Penulis berhasil mendapatkan hibah dana pada penulisan PKM, yaitu pada tahun 2013 dengan judul “AQUIND: Inovasi Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Bahan Bakar Kompor Air”, pada tahun 2014 dengan judul “Mikrozonasi dan Analisis Kegempaan Berdasar Efek Lokal Menggunakan Metode Microtremor Pada Gedung Gelora Bung Tomo”, dan pada tahun 2015 dengan judul “Monitoring Persebaran Retakan Pada Tanggul LUSI Menggunakan Metode VLF-EM” serta pada akhir semester ke-8, penulis diundang sebagai pemakalah dalam *SPG/SEG 2016 International Geophysical Conference* di Beijing, China. Selain menjuarai beberapa kompetisi ilmiah, Penulis juga aktif dalam organisasi kemahasiswaan yaitu dalam Badan Eksekutif Mahasiswa FMIPA, sebagai ketua departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa pada tahun 2014/2015.